



**Universidad Nacional Mayor de San Marcos**

**Universidad del Perú. Decana de América**

**Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica**

**Escuela Profesional de Ingeniería Geológica**

**Metodología para el análisis prospectivo y de  
exploración por minerales económicos**

**INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL**

**Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geólogo**

**AUTOR**

**Moisés ORTEGA OROSCO**

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

## Referencia bibliográfica

---

Ortega, M. (2017). *Metodología para el análisis prospectivo y de exploración por minerales económicos*. [Informe de experiencia profesional, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geológica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

---

469



**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**  
 Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**  
 Escuela Profesional de Ingeniería Geológica

**ACTA De SUSTENTACIÓN De INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL**  
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓLOGO**

12  
118

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, el día lunes 6 del mes de marzo del año 2017, siendo las 11:00 horas, en presencia de los señores docentes designados como miembros del Jurado Calificador:

Mg. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN	(Presidente de Jurado)
Ing. MANUEL ISMAEL ALDANA ALVAREZ	(Miembro de Jurado)
Ing. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO	(Miembro de Jurado)

Reunidos para el acto académico público de colación del Informe de Experiencia Profesional del Sr. MOISÉS ORTEGA OROSCO, Bachiller en Ingeniería Geológica quien sustentará el Informe de Experiencia Profesional titulado: «**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS PROSPECTIVO Y DE EXPLORACIÓN POR MINERALES ECONÓMICOS**», para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Geólogo.

Los miembros del Jurado, escuchada la colación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

A SATISFACCION DEL JURADO

El Jurado procedió a la calificación, cuyo resultado fue:

POR UNANIMIDAD CON NOTA DE DIECISEIS (16)

Habiendo sido aprobada el Informe de Experiencia Profesional por el Jurado examinador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, proponga se le otorgue el Título Profesional de Ingeniero Geólogo al Sr. MOISÉS ORTEGA OROSCO.

Siendo las 11:40 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales del Informe de Experiencia Profesional.

Ciudad Universitaria, 06 de marzo del 2017

**Mg. CIRO SERGIO BEDIA GUILLEN**  
 PRESIDENTE DE JURADO

**Ing. MANUEL ISMAEL ALDANA ALVAREZ**  
 MIEMBRO DE JURADO

**Ing. LOURDES JANET QUIÑONES LAVADO**  
 MIEMBRO DE JURADO



## INDICE

<b>RESUMEN</b>	1
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	3
1.1 ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA	4
1.2 ACTIVIDADES DESARROLLADOS POR LA EMPRESA	5
<b>II. DESCRIPCION DETALLADA DEL PROYECTO DE INGENIERIA</b>	6
2.1. DESCRIPCION DEL TEMA	6
2.2. ANTECEDENTES	6
2.3. JUSTIFICACIÓN	8
2.4. OBJETIVOS	8
2.4.1. Objetivo general	8
2.4.2. Objetivos específicos	8
2.5. MARCO TEÓRICO	9
2.5.1. Alteración hidrotermal	9
2.5.2. Zona de alteración supérgena	11
2.5.3. Aplicaciones de la proyección estereográfica	13
2.5.4. Parámetros estadísticos	18
2.5.4.1. Medidas de tendencia central	18
2.5.4.2. Medidas de dispersión	19
2.5.4.3. Coeficientes de la forma de distribución	20
<b>III. CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS Y PETROGRÁFICAS</b>	22
3.1. INDICE MINERAL	22
3.2. CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS	36
3.2.1. Clasificación de rocas plutónicas - Sistema I.U.G.S	37
3.2.2. Clasificación de rocas volcánicas - Sistema I.U.G.S	42
3.2.3. Clasificación de rocas volcanoclásticas - Sistema I.U.G.S	43
3.2.4. Rocas ígneas hipoabisales	45
3.3. ROCAS METAMÓRFICAS	46
3.4. ROCAS SEDIMENTARIAS	49
<b>IV. CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO</b>	53
4.1. EQUIPOS DE CAMPO	53

4.2. MÉTODOS DE CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO.....	56
4.2.1. Sección transversal o "Traver".....	56
4.2.2. Siguiendo contactos.....	57
4.2.3. Cartografiado en una zona de pobre afloramientos.....	58
4.3. PLANOS BASE.....	59
4.3.1. Plano de ubicación y accesibilidad.....	59
4.3.2. Plano de petitorios mineros.....	60
4.3.3. Plano de cuencas hidrográficas y el área de estudio.....	60
4.3.4. Plano geológico regional-metalotecto y ocurrencias minerales.....	61
4.3.5. Plano regional de lineamientos estructurales y ocurrencias.....	62
4.3.6. Plano satelital regional.....	63
4.3.7. Plano litológico local.....	64
4.3.8. Plano de densidad de fracturamiento.....	64
4.3.9. Plano estructural.....	65
4.3.10. Plano de alteraciones hidrotermales.....	66
4.3.11. Plano de ubicación de muestras.....	67
4.3.12. Plano geoquímico de Au y multielementos.....	67
<b>V. PROSPECCIÓN GEOQUÍMICA.....</b>	<b>69</b>
5.1. Tabla periódica de los elementos químicos.....	69
5.2. Abundancia promedio de elementos en la corteza terrestre.....	70
5.3. Promedio de elementos trazas en suelos.....	71
5.4. Agrupación geoquímica de elementos.....	71
5.5. Geoquímica en los tipos de yacimientos minerales.....	73
5.6. Límites aproximados de detección en ppm para los métodos analíticos.....	75
5.7. MUESTREO GEOQUÍMICO.....	76
5.7.1. Muestreo geoquímico de sedimentos de quebrada.....	77
5.7.2. Muestreo geoquímico de suelos.....	81
5.7.3. Muestreo geoquímico de rocas.....	83
5.7.4. Muestras de control o QA-QC.....	87
5.8. Correlaciones geoquímicas.....	89
5.9. Análisis multivariado de componentes principales.....	89
5.10. Comportamiento estadístico y anomalías geoquímicas.....	90
5.10.1. Valor de fondo o background.....	90

5.10.2. Umbral geoquímico o Treshold.....	90
5.10.3. Anomalías geoquímicas.....	91
<b>VI. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....</b>	<b>92</b>
6.1. MAGNETOMETRÍA.....	92
6.2. EL MÉTODO DE POLARIZACIÓN INDUCIDA.....	94
6.2.1. Resistividad.....	94
6.2.2. Polarización inducida.....	96
6.3. RADIOMETRÍA.....	99
<b>VII. PERFORACIÓN.....</b>	<b>100</b>
7.1. Perforación de aire reverso.....	104
7.2. Perforación diamantina.....	106
7.3. Logueo geológico de testigos.....	107
7.4. Intervalos de muestreo.....	110
7.5. Fotografiado de corte.....	110
7.6. Corte y muestreo de testigos.....	112
7.7. Culminación de la perforación.....	115
<b>VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
8.1. CONCLUSIONES.....	116
8.2. RECOMENDACIONES.....	116
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>117</b>

## RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema de zonas de alteración (Lowell y Guilbert, 1970).
- Figura 2. Una sección esquemática de un típico pórfido de cobre (A.Sutulov, 1975).
- Figura 3. Elementos que definen una recta y un plano en geología.
- Figura 4. Proyección estereográfica de un plano inclinado.
- Figura 5. Diagrama de densidad de polos: a) en proyección equiareal y en proyección estereográfica (equiangular).
- Figura 6. a) Brújula de geólogo. b) Afloramiento rocoso de margas con yesos.
- Figura 7. Elementos de un plano y una recta.
- Figura 8. Determinación del eje y del plano axial de un pliegue cilíndrico con inmersión.
- Figura 9. a) Sesgo positivo; b) Sesgo negativo
- Figura 10. Diagrama QAPF simplificado para clasificación en campo de rocas plutónicas (después de Streckeisen, 1976).
- Figura 11. Clasificación y nomenclatura de rocas plutónicas de acuerdo al contenido modal de los minerales usando el diagrama de QAPF (basados en Streckeisen, 1976). Las esquinas del triángulo doble son Q = cuarzo, A= Feldespato potásico, P= plagioclasas y F= Feldespatoide. El diagrama no debe ser usado para rocas en las cuales el contenido de minerales máficos, M, es mayor a 90%.
- Figura 12. Diagrama triangulares para la clasificación y nomenclatura de rocas gabroicas basadas en las proporciones de plagioclasas, piroxenos, olivino, clinopiroxenos y hornblenda.
- Figura 13. Diagrama triangulares para la clasificación y nomenclatura de rocas ultramáficas basadas en las proporciones de olivino (Ol), ortopiroxenos (Opx), clinopiroxenos (Cpx), piroxenos (Px) y hornblenda (Hbl).
- Figura 14. A) Monzonita con cuarzo, presenta trazas de calcopirita diseminada, obsérvese la textura granular o fanerítica; B) Monzonita, apréciase los cristales alargados y pequeños de hornblenda junto a cristales de feldespato potásico de color rosado y blanco (Mina Las Bambas); C y D) Afloramiento de intrusivo granodiorítico de textura fanerítica (carretera Chalhuanca-Abancay), E y F) Afloramiento de diorita mineralizada, obsérvese la predominancia de cristales máficos (hornblenda) junto a plagioclasas (Prospecto Sarconta).

- Figura 15. A) Diagrama QAPF para clasificación en campo de rocas volcánicas; B) Clasificación y nomenclatura de rocas volcánicas de acuerdo al contenido modal (cuantitativo) de los minerales usando el diagrama QAPF (basado en Streckeisen, 1978).
- Figura 16. Clasificación de rocas piroclásticas polimodales en las proporciones de bloques/bombas, lapilli y cenizas según Fisher (1961).
- Figura 17. A) Secuencia volcánica compuesta por tobas cristalinas y tobas líticas (Mina Pallancata), B) Andesita de color gris, se observan pequeños cristales de plagioclasa envueltos en una matriz criptocristalina (Mina Inmaculada), C) Toba lítica, obsérvense los fragmentos líticos soportados en una matriz de ceniza soldada, D) Textura fluidal de un domo de composición riolítica (Prospecto Zamira).
- Figura 18. A y B) Pórfidos dioríticos, obsérvese la textura porfírica con cristales subhedrales de plagioclasa, y cortado por venillas de sílice (Proyecto Viruna), C y D) Pórfido diorítico cortado por venillas cuarzo-pirita (Prospecto Mumalca).
- Figura 19. Distribución de facies metamórficas sobre un diagrama Presión-Temperatura (P-T). Las zonas blancas corresponden a asociaciones de transición.
- Figura 20. A) Secuencia de esquistos grisáceos pertenecientes a la formación Salas, B) Vista al detalle de los esquistos, mostrando los planos de esquistosidad rellenos con cuarzo de segregación e hidrotermal (Prospecto El Paalto).
- Figura 21. Esquema de clasificación de las areniscas, limolitas y lutitas de acuerdo a la granulometría y su abundancia en la roca.
- Figura 22. Clasificación de areniscas (arenitas y grauvacas) de acuerdo a su composición. Adaptada de Dott (1964), Dickinson (1970) y Pettijohn et al. (1987). Izquierda: Q = cuarzo, F = feldespatos y L = fragmentos líticos.
- Figura 23. Grado de redondez y angulosidad de granos (sedimentos) y clastos. Tomado de Power (1953), Tucker (1991) y Pettijohn et al. (1987).
- Figura 24. Sistemas de clasificación de rocas clásticas intermedias entre diferentes fracciones granulométricas e intermedias para rocas detríticas y carbonatadas (después de Füchtbauer, 1959).
- Figura 25. Clasificación adecuada por Hallsworth & Knox (1999) para rocas carbonatadas, después de Dunham (1962), y Embry & Klovan (1971). Los esquemas mostrados en la parte inferior tienen una extensión sugerida de ~5 mm.
- Figura 26. A) Secuencia sedimentaria de limolitas grises, presentando óxidos de hierro en fracturas (Proyecto Mamulca), B) Estratos de areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas (Prospecto Liseth 9), C y D) Afloramiento de calizas grises pertenecientes a la formación Arcurquina (anteriormente Ferrobamba), obsérvese las venillas de calcita.

- Figura 27. Picotas, combas y cinceles utilizados para la prospección, cabe señalar que la picota del lado derecho es la más utilizada.
- Figura 28. Grupo de brújulas utilizadas por los geólogos de acuerdo a su conveniencia. La brújula Brunton es una de la más utilizadas en exploración.
- Figura 29. Lupa de aumento X10 de la marca IWAMOTO.
- Figura 30. GPS de la marca GARMIN, el cual posee una precisión de +/- 3 m.
- Figura 31. A) Escalímetros y protactor, B) Libreta de campo de fuerte cubierta, resistente al agua y humedad.
- Figura 32. Ejemplo de un “traver” de unidades sedimentarias, no tiene el acho real del terreno, se utiliza simplemente para grabar la distancia desde el inicio.
- Figura 33. Representación gráfica del cambio composicional del suelo, por medio de rodados y partículas minerales, razón por la que se infiere un cambio litológico.
- Figura 34. Plano de ubicación y accesibilidad de la Unidad Minera Las Bambas, nótese los accesos viales y localidades cercanas.
- Figura 35. Plano catastral de la zona de Canchaque, Piura; se observa resaltado los petitorios mineros de la C.I.A Montealto.
- Figura 36. Plano de cuencas hidrográficas más topografía, el área de estudio está señalada por el polígono de color rojo; región de Apurímac.
- Figura 37. Plano geológico regional junto a ocurrencias minerales, Región Apurímac.
- Figura 38. Plano de lineamientos estructurales regionales junto a ocurrencias minerales, Proyecto Alumbre.
- Figura 39. Plano satelital Landsat de la región Apurímac.
- Figura 40. Plano litológico local del prospecto Liseth (Ancash).
- Figura 41. Parte de un plano de densidad de fracturamiento, donde se muestra las proyecciones estereográficas de los sectores cartografiados.
- Figura 42. Plano estructural interpretado de la región Apurímac, mostrando la cinemática de las fallas.
- Figura 43. Plano de alteraciones hidrotermales, observe la focalización de la alteración (tomado de la tesis de F. Toribio, “Pucamarca: Nuevo yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración al sur del Perú”).
- Figura 44. Plano de ubicación de muestras de roca, colectadas en una campaña de reconocimiento; cada muestra contará con su código.
- Figura 45. Plano de anomalías geoquímicas de Au de sedimentos de quebrada.

- Figura 46. Plano isovalórico de anomalías geoquímicas de Au de rocas.
- Figura 47. Promedio de elementos traza en suelos (Swaine, D. 1955).
- Figura 48. A) Equipo de campo de geólogo, se observan picotas, brújula, GPS, radio comunicador; B) Materiales a utilizar para la prospección geoquímica: guantes, tamices, lavatorios, floculante y paleta.
- Figuras 49. Zona de menor energía propicia a extraer una muestra de sedimentos, obsérvese el material de arenas y limos a obtener. Quebrada Azulccasa, región de Apurímac.
- Figuras 50. Puntos recomendados a lo largo de la quebrada para la extracción de muestras de sedimentos.
- Figuras 51. A) Toma de la muestra de sedimento en la zona de menor energía; B) Tamizado de los sedimentos; C) Sedimentos finos obtenidos después del tamizado; D) Ordenamiento por códigos de las muestras obtenidas en el muestreo para su posterior empaquetamiento.
- Figura 52. Perfil general de suelos (Levinson, 1974).
- Figura 53. A) Calicata de 1 m. de profundidad, fotografía tomada para la base de datos; B) Extracción de la muestra de suelo en un balde plástico para ser tamizada.
- Figura 54. A y B) Muestreo geoquímico de roca por parte de los trabajadores, obsérvese los equipos de protección personal utilizados.
- Figura 55. A) Muestra en trinchera, la cual se le realizó canales de muestreo; B) Muestra en canal de alteraciones hidrotermales; C) Muestra en canal de veta de cuarzo con roca caja.
- Figura 56. Muestreo por esquirlas de roca o chip, se aprecia la red planteada.
- Figura 57. Muestreo selectivo de rodocrosita de una veta de cuarzo-rodocrosita-pirita (Veta Ángela, Mina Inmaculada).
- Figura 58. Tarjeta de muestreo para rocas y suelos (obtenido de Perú Minerals S.A.C.)
- Figura 59. Parámetros geoquímicos de una distribución, representados en un histograma de barras. El 95.0% caen entre el valor medio más/menos dos veces la desviación estándar, por lo tanto el 2.5% aproximado que excede a este límite superior es considerado como un valor anómalo.
- Figura 60. Plano de anomalías geoquímicas (Au, Ag, Cu y Mo) de sedimentos de quebrada (región Apurímac).
- Figuras 61. A) Preparación del magnetómetro portátil para iniciar la toma de datos; B) Proceso de medición de las líneas geofísicas.

- Figuras 62. A) Magnetómetro aéreo y plano resultante de la toma de datos; B) Helicóptero realizando la toma de datos.
- Figura 63. Diagrama de resistividad para distintos tipos de roca y minerales (modificado de Orellana, 1982).
- Figura 64. Medida de IP (Cargabilidad), a través del decaimiento de voltaje (Reynolds, 1997).
- Figuras 65. A y B) Instalación del punto de inyección de electricidad, éste se ubica a una distancia aproximada de 1 km. de las líneas geofísicas.
- Figuras 66. A) Instalación de placas metálicas, encargadas de conducir la electricidad al subsuelo; B) Elaboración de una pequeña calicata de 0.50 x 0.50 m.; C) Colocación de la placa en la calicata, se le agregó suelo humedecido en la parte inferior y superior; D) Finalización de la instalación, se cubre nuevamente la calicata quedando los dos conectores fuera.
- Figuras 67. Perfiles geofísicos obtenidos como resultado del método de inducción polarizada, se puede observar que la resistividad es opuesta a la cargabilidad.
- Figura 68. Mapa geofísico de radiometría total de conteo total.
- Figura 69. Proyecto minero en fase de perforación, Proyecto Viruna (Cusco).
- Figuras 70. Elaboración de accesos por personal, Proyecto Alumbre (La Libertad).
- Figuras 71. Accesos realizados por el tractor D7, se puede observar el ancho de la vía y control adecuado del talud (Proyecto Alumbre).
- Figuras 72. Construcción de la poza de almacenamiento de agua.
- Figuras 73. A) Plataforma de 10 x 5 m (Proyecto Curunday); B) Plataforma de 10 x 10 m (Proyecto Viruna); C y D) Pozas de sedimentación, obsérvese la geomembrana de color azul.
- Figuras 74. A) Traslado de la perforadora o taladro; B) Instalación de la máquina perforadora diamantina.
- Figura 75. A) Máquina de perforación de aire reverso, obsérvese el camión y castillo; B) Esquema de sondaje de aire reverso con cabezal de tricono, mostrando el flujo de aire comprimido a través de las barras de doble cámara.
- Figura 76. A) Se observa el panel de control, los generadores eléctricos y el asistente de perforación (Proyecto Curunday); B) Castillo y unidad de rotación con un ángulo de 90°(Proyecto Viruna).
- Figura 77. A) Ordenamiento de las cajas de testigos para realizar un logueo al detalle (Proyecto Viruna); B) Testigos de perforación separados por tacos medidores (indican la corrida del taladro).



- Figura 78. Modelo de formato de logueo, obsérvese los datos del sondaje en la parte superior y las descripciones de cada tramo.
- Figura 79. A) Fotografiado de las cajas de testigos con luz natural indirecta; B) Fotografía de testigos, mostrando el taco de profundidad y el “desde” - “hasta”; C) Foto al detalle o “close up” de venillas.
- Figura 80. A y B) Máquina de corte o petrótomo, se puede observar el disco diamantado utilizado por el personal clasificado, nótese los equipos de protección personal obligatorios.
- Figura 81. A) Muestreo de testigos; B) Colocación de las muestras en las bolsas especiales; C) Tarjeta de muestreo; D) Corte de colchones de espuma para proteger las muestras; E) Aseguramiento de la caja de testigos; F) Apilamiento de las cajas de testigos.
- Figura 82. A) Remediación de plataforma de perforación; B) Monumento de cemento colocado al finalizar la perforación (Proyecto Curunday).

## RELACION DE TABLAS

- Tabla 1. Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (tomado de Corbett y Leach, 1998).
- Tabla 2. Minerales comúnmente encontrados por los geólogos, y los de mayor importancia económica.
- Tabla 3. Clasificación y nomenclatura de fragmentos piroclásticos y rocas piroclásticas, basado en el tamaño de clastos (después de Schmid, 1981).
- Tabla 4. Clasificación de rocas volcanoclásticas con contenido mayor al 10% de fragmentos volcánicos (basado en Schmid, 1981). Términos usados para la mezcla de rocas epiclásticas y piroclásticas.
- Tabla 5. Minerales de retrogresión comunes en diferentes categorías de rocas metamórficas.
- Tabla 6. Clasificación de calizas usando su textura. Modificado de Dunham (1962), Embry & Klovan (1972), y Wright (1992).
- Tabla 7. Tabla periódica de elementos químicos (modificado de Mendeleiev, 2000).
- Tabla 8. Todos los valores están en ppm a excepción de las aguas de río (A. Levinson, 1974).
- Tabla 9. Metales de mena, mineralogía y casos geológicos, (modificada de Craig, 1979).
- Tabla 10. Elementos indicadores de los distintos tipos de yacimientos minerales (Compilación de Boyle, 1974, Beus y Grigorian, 1977 y Rose, 1979).
- Tabla 11. Zonación lateral y vertical, elementos en orden decreciente de la extensión de sus dispersiones; desde la izquierda a la derecha, los indicadores gradúan abajo hacia los indicadores de la sub-mena.
- Tabla 12. Límites de detección en ppm para los diferentes métodos analíticos.
- Tabla 13. Uso de los tipos de muestras geoquímicas en las diferentes etapas de la exploración (Coope et al, 1993). X, utilizados ocasionalmente en ambientes adecuados; XX, utilizados en ambientes adecuados.
- Tabla 14. Cargabilidad de minerales (Telford et al., 1990).

## **RESUMEN**

La metodología para el análisis prospectivo y de exploración por minerales económicos son procedimientos usados por el geólogo para localizar depósitos minerales, e iniciar la actividad minera.

La prospección inicia con la determinación y enmarcación de una zona; la cual, pueda presentar posibilidades de la existencia de un determinado tipo de depósito mineral.

Para esta determinación se realizará un trabajo de gabinete, en el que contaremos con el apoyo de información bibliográfica, mapas, fotos aéreas, imágenes satelitales, informes y boletines geológicos. Luego de identificar y establecer las posibilidades del área de interés se procederán con los trámites legales de petitorios mineros, llevados a cabo en el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Antes de iniciar con los procedimientos de prospección, es fundamental tener como base teórica la información de minerales y rocas. En la lista de minerales se detallará la composición química y características más resaltantes (dureza, densidad y sistema de cristalización); con respecto a las rocas se dividieron, según su origen, en tres grandes grupos: rocas ígneas (clasificadas por medio de diagramas simplificados del sistema I.U.G.S.), sedimentarias y metamórficas.

El cartografiado geológico de un prospecto nos mostrará características fundamentales de la zona, por ejemplo: los tipos de unidades litoestratigráficas e intrusiones, el control estructural, la alteración hidrotermal y la mineralización. Todas estas características estarán representadas en diferentes tipos de planos, con el objetivo de efectuar una adecuada interpretación del contexto geológico-estructural.

La prospección geoquímica consiste básicamente en obtener muestras de rocas, suelos o sedimentos por medio de métodos especializados de muestreo; donde todas éstas serán enviadas al laboratorio para ser analizadas por técnicas analíticas (según la especificación del geólogo).

Cabe señalar que el muestreo de sedimentos de quebrada es mayormente utilizado en la delimitación de blancos de exploración o “targets” a nivel regional, es decir, en la localización de un potencial prospecto.

La prospección geofísica se divide en tres métodos: magnetometría, inducción polarizada y radiometría. Se seleccionará un método geofísico apropiado para utilizarse en el prospecto, siendo el geólogo de proyecto, el encargado de seleccionarlo. El producto final de la geofísica será una serie de planos y secciones isovalóricas, donde se podrán visualizar las anomalías concurrentes en el área de estudio (señalización de un probable cuerpo mineralizado).

La exploración del subsuelo se inicia con el proceso de perforación; el cual, se divide en: perforación diamantina y aire reverso. El presente trabajo también elabora, la metodología usada en la perforación diamantina.

El objetivo del análisis en conjunto de la información y características geológicas de la prospección, determinadas por el geólogo, es de establecer la existencia de un depósito con mineralización económica en profundidad, estableciendo previamente la ubicación de puntos estratégicos de los sondeos de exploración, para determinar sus características geológicas, ley, extensión y profundidad.

## **I. INTRODUCCIÓN**

Durante millones de años, los recursos minerales se han formado en lugares específicos del subsuelo, siendo cada vez más escasos y difícil de ubicar; no obstante, la minería necesitará del estudio de la geología y diversas disciplinas para hallarlos.

La actividad minera inicia con la realización de una serie de actividades de trabajo conocidas como prospección (geoquímica y geofísica) y exploración (sondeos de exploración), teniendo como objetivo focalizar depósitos minerales de interés económico, estudiarlos y tratar de entender los procesos naturales que los originó; ello supone un elevado riesgo económico.

El geólogo de exploraciones será el encargado de propiciar dicha búsqueda, por medio de sus conocimientos y experiencia; además de contar con el apoyo de un equipo de profesionales y múltiples disciplinas.

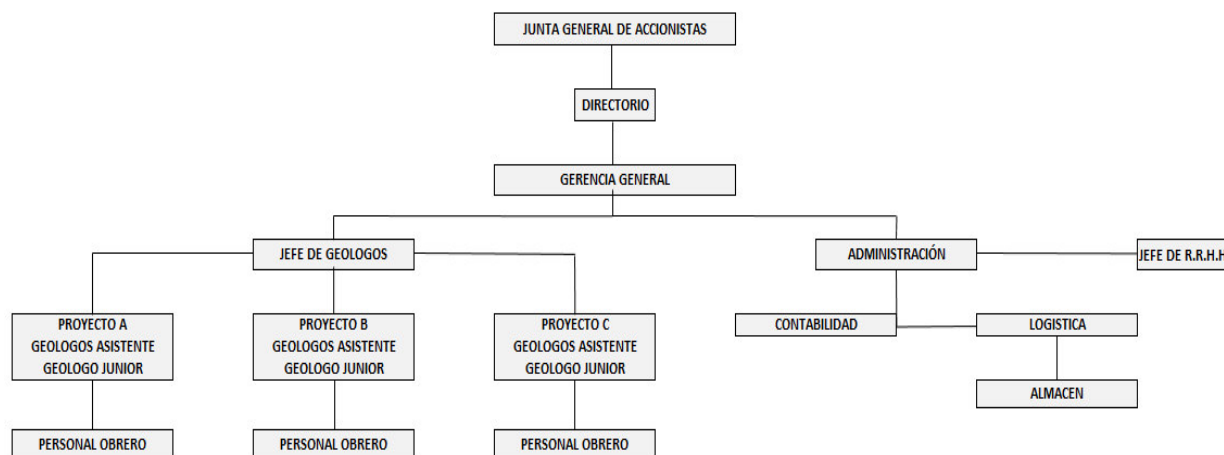
El geólogo realizará un óptimo trabajo con los procedimientos prospectivos, para obtener resultados eficientes y confiables; empleando, el análisis del contexto geológico - estructural y la génesis de la actividad hidrotermal aportadora de la mineralización económica.

El presente trabajo está basado en el análisis prospectivo y exploratorio de minerales económicos, y demás herramientas geológicas; con especial énfasis en los procedimientos prospectivos y aplicación de conceptos prácticos.

La presente información servirá de guía para los geólogos que deseen seguir la especialidad de exploraciones por minerales económicos.

## 1.1 ORGANIZACIÓN DE LA EMPRESA

La organización jerárquica de la empresa encargada de las exploraciones mineras en las concesiones, presenta la siguiente organización:



El presente informe hace una descripción de la experiencia profesional del que suscribe como geólogo de exploraciones. Las labores encomendadas por el geólogo de exploraciones es ejecutar los programas de exploraciones y perforaciones del proyecto a su cargo, dentro del área de concesiones mineras de la Empresa.

Las actividades realizada por el geólogo asistente de exploraciones consiste en diseño y desarrollo de los programas de exploración mediante los trabajos de campo, el cartografiado geológico regional y local: litología, alteraciones hidrotermales, geología estructural, etc., el muestreo geoquímico que consiste en la recolección de muestras mineralizadas que serán enviadas al laboratorio para su análisis geoquímico y posterior evaluación económica, dentro de los estándares de control calidad de las muestras. Manteniendo los estándares de control de calidad, asimismo el desarrollo de exploraciones avanzadas mediante sondeos diamantinos: actualizando la data de logueo de los testigos/núcleos de perforación, muestras geoquímicas, programas de geofísica, gestión en logísticas, planificación, organización, liderazgo, control y evaluación.

Realizando la interpretación geológica, geoquímica y geofísica de los datos obtenidos mediante la exploración. Velar por el cumplimiento de las normas de seguridad, salud, calidad y medio ambiente estipuladas y compromiso con las comunidades.

## 1.2 ACTIVIDADES DESARROLLADOS POR LA EMPRESA

Empresa dedicada a la exploración, gestión de proyectos para el sector minero y titular de derechos mineros en el Perú, focalizada en metales preciosos y “comodities” de metales bases, que figuran en la bolsa de valores de Australia.

La empresa tiene una cartera de proyectos de exploración avanzada, en las provincias metalogenéticas del Perú.

Empresa focalizada en América Latina desde 2010, dedicada a la exploración de depósitos de bajo costo y alto tonelaje. Una gran oportunidad para los inversionistas, generando nuevas perspectivas para expandir su cartera de proyectos.

Su **Misión** es una empresa de ingeniería que desarrolla proyectos de exploración, desarrollando soluciones técnicas y gestión en el sector minero a fin de generar valor a nuestros inversionistas, colaboradores y accionistas.

La empresa conoce la realidad nacional y la importancia de mantener buenas relaciones con las comunidades en sus proyectos de exploración y el respeto a su cultura, asimismo manteniendo el cuidado al ecosistema, permitiendo el desarrollo sostenible a largo plazo. Ejecutando trabajos de cierre y rehabilitación de las áreas usadas o perturbadas por la actividad minera.

La **Visión** es ser una empresa líder en ingeniería, reconocida por brindar soluciones eficientes a nuestros inversionistas.

Sus **Valores** es buscar la excelencia, aplicando los más altos estándares de calidad en nuestros servicios, trabajamos en equipo, reconociendo que el aporte individual contribuye al resultado final.

## **II. DESCRIPCIÓN DETALLADA DEL PROYECTO DE INGENIERÍA**

### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL TEMA**

El presente informe, describirá la experiencia profesional del que suscribe en los trabajos en cada uno de las fases de exploración, la metodología y el análisis prospectivo y exploratorio para focalizar depósitos con valor económico.

Este informe se presenta como una guía para reconocer, localizar, cartografiar, sondear y muestrear, para analizar y diagnosticar depósitos económicos, desde el reconocimiento mineralógico, clasificación de rocas, cartografiado geológico en sus diversas unidades estratigráficas y métodos, el análisis geológico en su contexto regional, ocurrencias de mineralización, análisis local, análisis de densidad de fracturamiento, análisis estructural, alteraciones hidrotermales, tipos de muestreo, control de calidad de muestreo, análisis estadístico geoquímico, análisis de anomalías geoquímicas, análisis geofísico, procedimiento de sondeos diamantinos y aire reverso, colección de datos en la etapa de evaluación de los sondeos, como logueo, intervalos de muestreo, fotografiado testigos, hasta la culminación de la etapa de perforación, y la evaluación de los datos recolectados cuyo objetivo es el hallazgo del depósito mineral económico.

### **2.2. ANTECEDENTES**

El presente informe se basa en la experiencia profesional como geólogo de exploraciones, en diversas empresas, esta experiencia está dada en un cúmulo de trabajos en los siguientes proyectos:

➤ En el 2008 al 2009 (**IAMGOLD**), se realizaron trabajos de exploración regional, en ello se ejecutó el sistema de muestreo de sedimentos de quebrada en las regiones de Cajamarca y Puno.

Se realizó un muestro sistematizado de roca (enmallado geoquímico) en el Proyecto Paccha, donde las muestras se describieron macroscópicamente en las tarjetas otorgadas por la empresa; además se elaboraron planos geológicos, geoquímicos y estructurales con la información obtenida

➤ En el 2010 al 2011 (**Compañía de exploraciones Orion**), se realizaron trabajos de exploración en el Proyecto Viento; en el cual se realizaron trabajos de cartografiado



litológico, estructural y alteraciones hidrotermales, colección de datos estaciones estructurales con proyecciones estereográficas, colectándose muestras de suelo y roca (Viento).

En el Proyecto Viruna se realizaron trabajos de exploración avanzada de sondeos diamantinos, en el cual se realizaron trabajos de logueo (registro litológico, estructural, mineralización, alteraciones hidrotermales, densidad, RQD, fotografiado, etc.), toma de susceptibilidad magnética de testigos de perforación, corte de testigos, preparación de muestras, incorporando un programa de QA&QC, y envío a los laboratorios.

➤ En el 2011 al 2013, se realizaron trabajos de exploración en los Proyecto Curunday, Alumbre y Quinual, en ella se realizaron trabajos de cartografiado litológico, estructural y alteraciones hidrotermales, colección de datos estaciones estructurales con proyecciones estereográficas, colectándose muestras superficiales para análisis geoquímico: muestras de tipo canaleta, esquirlas areales, selectivas, al que fueron incorporados el procedimiento del QA/QC durante el programa de exploraciones, por parte de la empresa Promesa Ltd. Así como trabajos geofísicos de Inducción Polarizada, Magnetometría y Espectrometría de rayos gamma por parte de la empresa Valdo'r Geofísica (VDG del Perú), mediante una malla geofísica de 22.8 km.

➤ En el 2014, en el Proyecto Alumbre, se realizaron trabajos de exploración avanzada de sondeos diamantinos, en el cual se realizaron trabajos de logueo (registro litológico, estructural, mineralización, alteraciones hidrotermales, densidad, RQD, fotografiado, etc.), corte de testigos, preparación de muestras, incorporando un programa de QA&QC y envío a los laboratorios.

➤ En el 2014 al 2015 (**Compañía Minera Montealto**), se realizaron netamente trabajos exploratorios para evaluar el potencial minero-geológico de 92 áreas concesionadas por el contratista, presentando un informe técnico-geológico detallado de cada área.

➤ En el 2015 al 2016 (**INGEMMET**), se realizaron trabajos de investigación geológica-científica del Batolito de Andahuaylas-Yauri en la región de Apurímac, en convenio con KIGAM (Instituto geológico de Korea). En consecuencia, esta investigación incluye una interpretación metalogenética, por lo que se utilizaron diferentes herramientas como inclusiones fluidas, isótopos de plomo, geocronología, secciones delgadas y pulidas,

análisis geoquímico multielemental y roca total (XRF), y análisis estadístico de los elementos oro, plata, cobre y molibdeno de las muestras de sedimentos de quebrada, con el objetivo principal de focalizar y delimitar áreas de interés económico.

## **2.3. JUSTIFICACIÓN**

La importancia del presente trabajo, es la descripción de los procedimientos y el análisis en los trabajos de exploración, que servirán en la orientación de la búsqueda de depósitos económicos y contribuir de manera amplia en el conocimiento de la geología.

El presente informe aporta algunas técnicas de reconocimiento de los depósitos económicos, un mayor conocimientos en los procedimientos de éstos determinaría aminorar el riesgo en la inversión en los hallazgos, la explotación de los recursos mineros subterráneos y a tajo abierto de gran volumen y mayor inversión, transformaría las regiones con un impacto positivo en los poblados cercana los proyectos mineros y en la regiones.

El hallazgo de los depósitos económicos demandaría bienes y servicios e infraestructuras así como recursos humanos calificados.

## **2.4. OBJETIVOS**

### **2.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Describir la metodología para el análisis prospectivo y de exploración para el hallazgo de depósitos de minerales económicos.

### **2.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las características mineralógicas para la clasificación litológica.
- Explicar las técnicas y/o métodos para un cartografiado geológico: litología, alteración hidrotermal y análisis estructural.
- Describir los procedimientos prospectivos generalmente utilizados en el hallazgo de un depósito mineral económico.
- Describir los procedimientos para el análisis geoquímico y estadístico de las anomalías geoquímicas de un depósito mineral económico.
- Explicar las técnicas para el análisis geofísico.
- Describir los procedimientos y tipos de sondeos de exploración del subsuelo.

## 2.5. MARCO TEÓRICO

### 2.5.1. Alteración hidrotermal

Según Meyer y Hemley (1967) clasificaron la alteración hidrotermal en los tipos: propilítica, argílica intermedia, argílica avanzada, sericítica y potásica.

- **Alteración Propilítica:** Presencia de **epidota** y/o **clorita** y ausencia de un apreciable metasomatismo catiónico o lixiviación de alcalis o tierras alcalinas; H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y S pueden agregarse a la roca y comúnmente se presentan también **albita**, **calcita** y **pirita**. Este tipo de alteración representa un grado bajo de hidrólisis de los minerales de las rocas y por lo mismo su posición en zonas alteradas tiende a ser marginal.
- **Alteración Argílica Intermedia:** Importantes cantidades de **caolinita**, **montmorillonita**, **smectita** o **arcillas** amorfas, principalmente reemplazando a plagioclasas; puede haber sericita acompañando a las arcillas; el feldespato potásico de las rocas puede estar fresco o también argilizado. Hay una significativa lixiviación de Ca, Na y Mg de las rocas. La alteración argílica intermedia representa un grado más alto de hidrólisis relativo a la alteración propilítica.
- **Alteración Sericítica o cuarzo-sericítica:** Ambos feldespatos (plagioclasas y feldespato potásico) transformados a **sericita** y **cuarzo**, con cantidades menores de caolinita. Normalmente los minerales máficos también están completamente destruidos en este tipo de alteración.
- **Argílica avanzada:** gran parte de los minerales de las rocas transformados a **dickita**, **caolinita**, **pirofilita**, **diásporo**, **alunita** y **cuarzo**. Este tipo de alteración representa un ataque hidrolítico extremo de las rocas en que incluso se rompen los fuertes enlaces del aluminio en los silicatos originando sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo). En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“vuggy silica” en inglés).
- **Alteración Potásica:** Alteración de plagioclasas y minerales máficos a feldespato potásico y/o biotita. Esta alteración corresponde a un intercambio catiónico (cambio

de base) con la adición de K a las rocas. A diferencia de las anteriores este tipo de alteración no implica hidrólisis y ocurre en condiciones de pH neutro o alcalino a altas temperaturas (principalmente en el rango 350°-550°C. Por esta razón, frecuentemente se refiere a la alteración potásica como tardimagmática y se presenta en la porción central o núcleo de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones intrusivos.

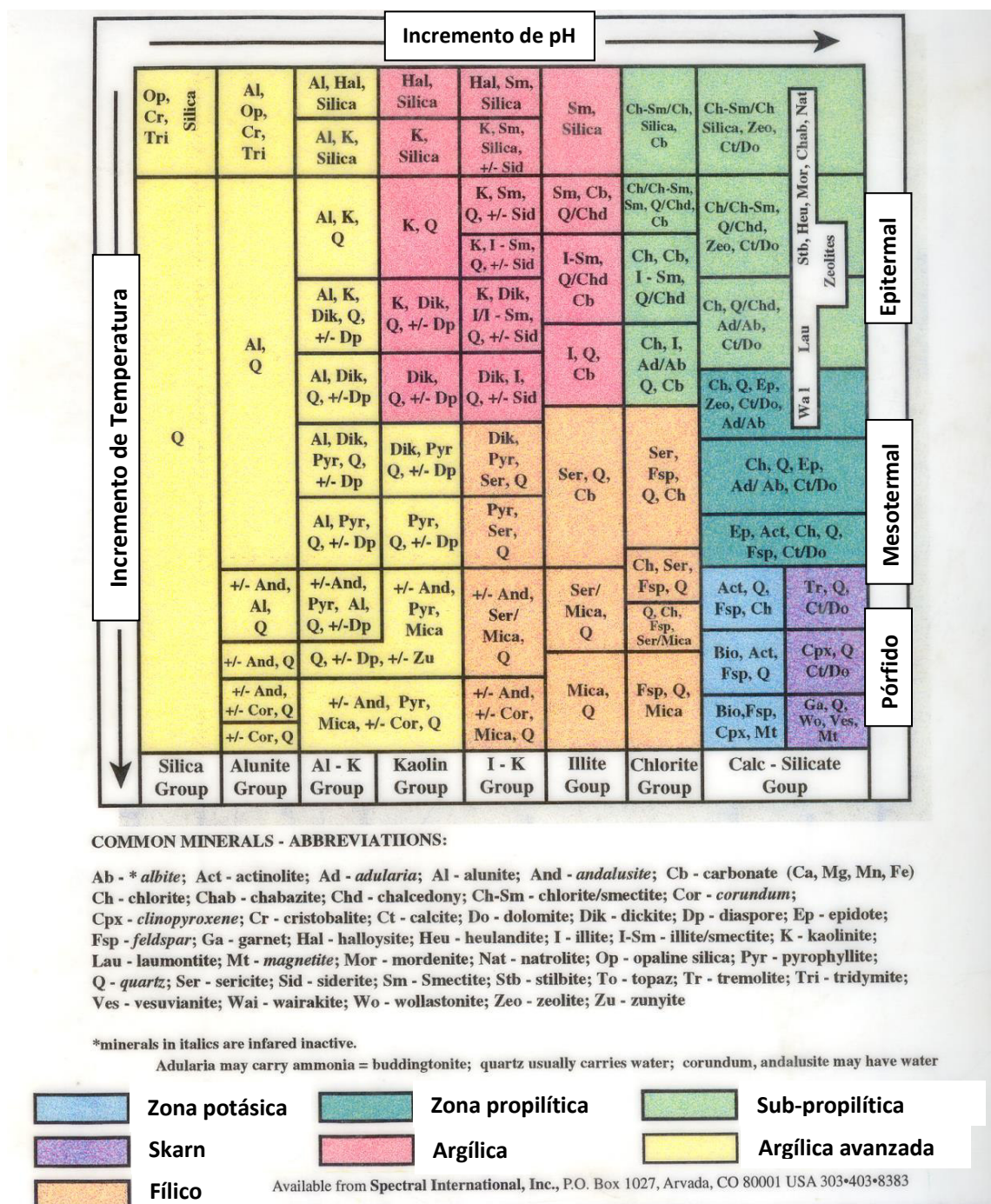
Carten (1986) definió la alteración sódico-cálcica en las zonas de raíz del pórfido cuprífero Yerrington (Nevada, USA), la que se caracteriza por una asociación de **actinolita, albita-oligoclasa-andesina, epidota, magnetita, clorita, cuarzo, escapolita**. Esta alteración ocurre en la porción profunda de pórfidos cupríferos y se desarrolla en forma simultánea con la alteración potásica a niveles más altos. En muchos estudios los minerales que la caracterizan la alteración sódico-cálcica se atribuían indistintamente a una alteración propilítica “de alta temperatura” y/o a alteración potásica.

Además, existe la alteración tipo **skarn**, la cual corresponde a la transformación de rocas carbonatadas (calizas, dolomitas) a minerales **calcosilicatados** en zonas adyacentes a intrusivos. Se caracteriza por la presencia de **granates (andradita y grosularita), wollastonita, epidota, diópsido, idocrasa, clorita, actinolita**. En los casos que los carbonatos son magnésicos (dolomitas) la asociación incluye: **forsterita, serpentina, talco, tremolita, clorita**.

**Skarn** es un término de origen sueco para designar rocas calcáreas metamorizadas, pero su uso se ha generalizado para depósitos minerales relacionados a fenómenos de metamorfismo de contacto y metasomatismo ligados a intrusiones que cortan secuencias de rocas carbonatadas. Es un tipo especial de alteración en la que la litología original es determinante en la asociación mineral resultante. (Meyer y Hemley, 1967)

➤ **Alteración tipo greissen** caracterizada por la asociación: muscovita, feldespato, cuarzo, topacio y/o turmalina. Se asocia a facies neumatolíticas de rocas graníticas y ocurre a temperaturas mayores de 250°C, generalmente en las porciones apicales o cúpulas de batolitos graníticos, donde se atribuye a la acumulación de volátiles

provenientes del Alteración Hidrotermal del magma o por incorporación de fluidos provenientes de la deshidratación de las rocas intruídas (Corbett y Leach, 1998).



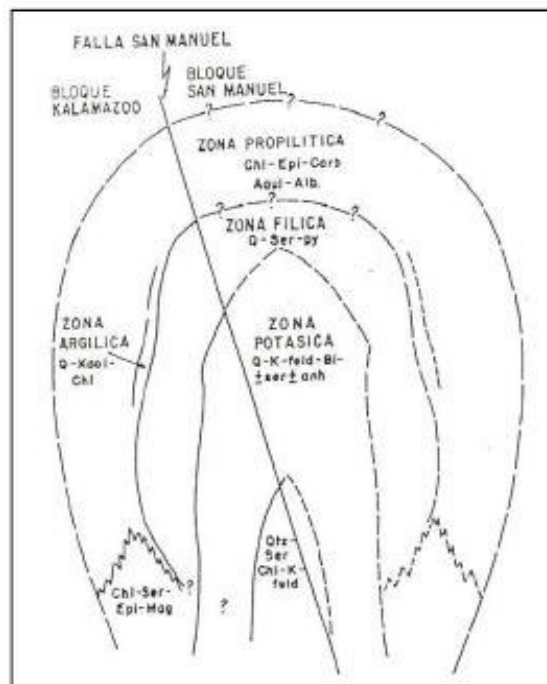
**Tabla 1.** Asociaciones de minerales de alteración comunes en sistemas hidrotermales (tomado de Corbett y Leach, 1998)

## 2.5.2. ZONA DE ALTERACIÓN SUPÉRGENA

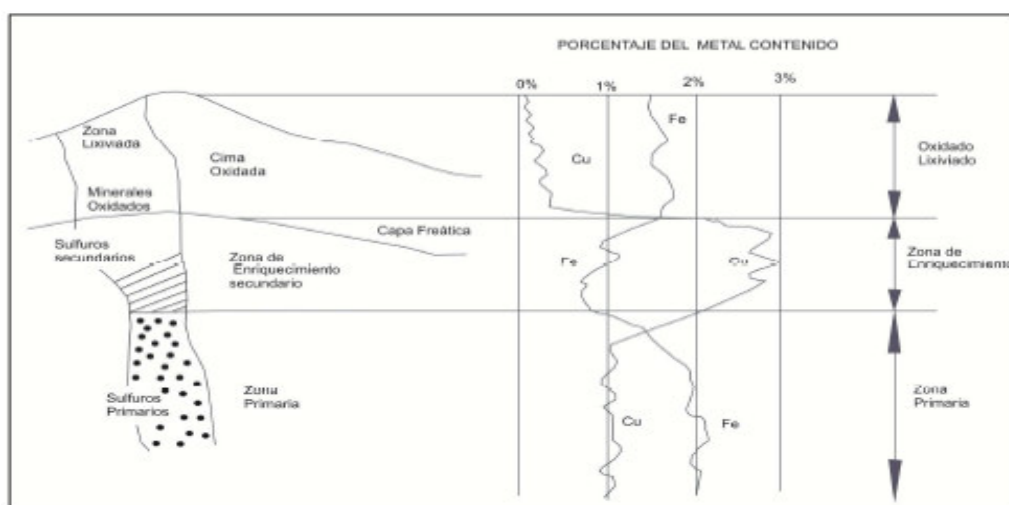
La alteración supérgena es un proceso de reequilibrio de la mineralogía hipógena a las condiciones oxidantes en las cercanías a la superficie (sobre el nivel de aguas subterráneas), por la circulación descendente de soluciones supérgenas. Afecta a los

silicatos generando minerales de arcillas y a los sulfuros hipógenos que se transforman en minerales oxidados. Los procesos supérgenos afectan a la alteración preexistente. Tanto la jarosita, como la alunita y caolín pueden ser minerales de alteración supérgena.

El perfil de alteración-mineralización descendiente de superficie corresponde a una zona lixiviada, con abundantes óxidos e hidróxidos de hierro, arcillas y cuarzo, con valores de Cu normalmente por debajo del 0.1-0.2%. Esta zona alcanza profundidades de 20 a 25 metros y en algunos casos llega hasta 400 metros (Lowell y Guilbert, 1970).



**Figura 1.** Esquema de zonas de alteración (Lowell y Guilbert, 1970)



**Figura 2.** Una sección esquemática de un típico pórfido de cobre (A. Sutulov, 1975).



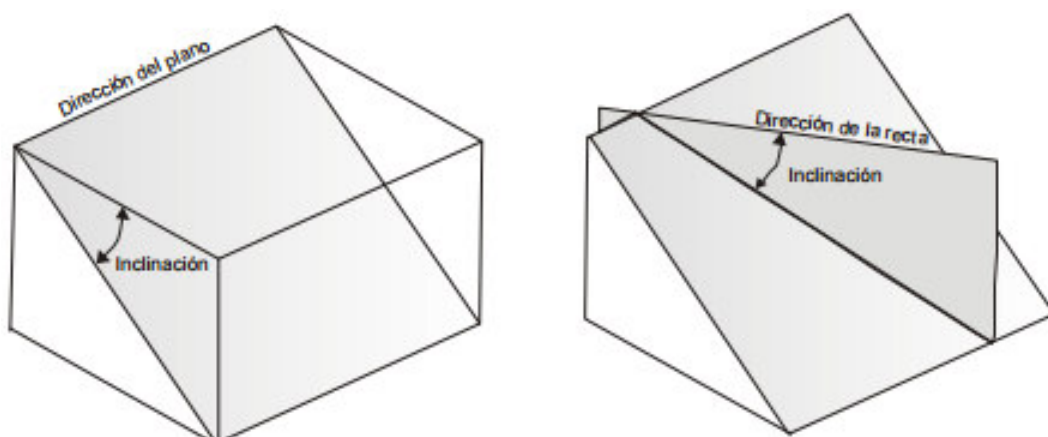
### 2.5.3. APLICACIONES DE LA PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA EN INGENIERÍA GEOLÓGICA

La proyección estereográfica es un tipo de proyección azimutal muy usado en cristalografía y geología estructural para establecer la relación angular existente entre las caras de los cristales o entre las estructuras geológicas. Todas las proyecciones permiten la representación de objetos tridimensionales en una superficie de dos dimensiones. Cualquiera que sea el sistema de proyección elegido, la representación plana presenta deformaciones que pueden ser lineales, angulares y superficiales. Dependiendo de la finalidad de la representación elegiremos uno u otros tipos de proyección. Por ejemplo, nos puede interesar que los ángulos se proyecten en verdadera magnitud aunque las magnitudes lineales y superficiales sufran deformaciones en mayor o menor grado.

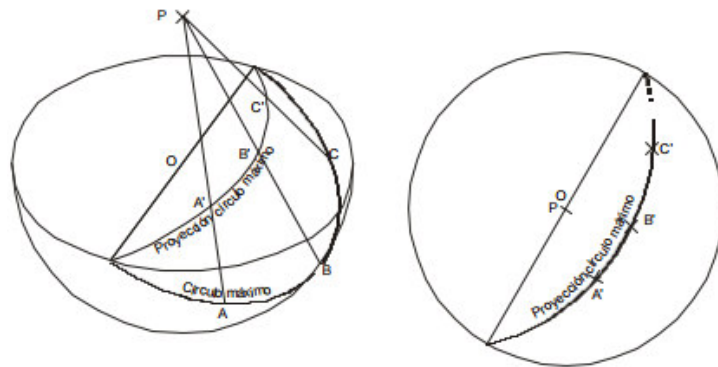
Para trabajar con la proyección estereográfica es preciso conocer, inicialmente, una serie de términos geométricos, que nos permitan definir de forma unívoca cada elemento (*Cuadro N°04*), estos términos nos determinan su orientación. La orientación se define como la posición de un plano o línea en el espacio, referenciado mediante coordenadas geográficas y su relación con el plano horizontal de comparación. (*Tomas Jover, Ferreira Prieto, et al. 2002*).

La orientación de un elemento queda definida mediante el rumbo y la inclinación:

- **Inclinación:** Ángulo vertical comprendido entre la horizontal y el plano o línea considerado.
- **Rumbo o dirección:** Ángulo horizontal comprendido entre una línea y una dirección preestablecida, el norte magnético en geología estructural.



**Figura 3.** Elementos que definen una recta y un plano en geología (Tomado de Phillips, 1951).



**Figura 4.** Proyección estereográfica de un plano inclinado (Tomado de Phillips, 1951).

En el *Cuadro N°05*: hemos representado la proyección estereográfica de un plano inclinado respecto al plano horizontal, definido por los puntos A, B, C, situados en un círculo máximo sobre la esfera.

- **Diagrama de polos o diagrama pi**

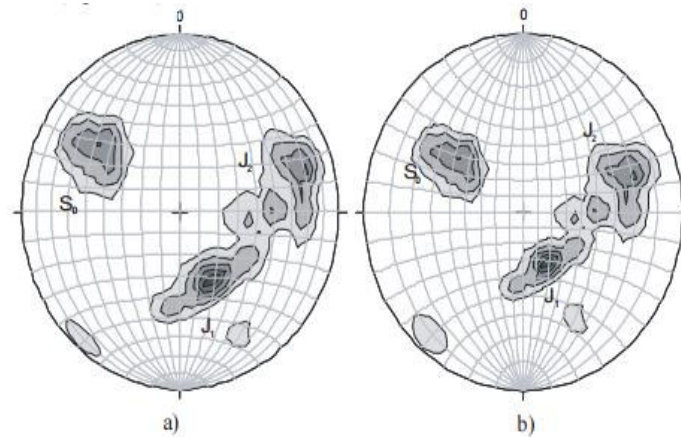
Cuando las medidas a representar en el diagrama son muy numerosas, la representación mediante círculos máximos puede dificultar la lectura de los resultados en la falsilla, por lo que se suele recurrir a los diagramas de polos o diagramas pi. En este tipo de diagramas se representan únicamente los polos de los planos o rectas, es decir la intersección de la recta con la esfera en el caso de elementos lineales o la intersección de la normal al plano con la esfera si se trata de elementos planos (Rosas, 2007).

- **Diagrama de densidad de polos**

La proyección estereográfica de un determinado elemento de la naturaleza, nunca es tan exacta como la de líneas y planos teóricos, ya que presentan irregularidades puntuales, falta de ajuste con la geometría ideal, en muchos casos, y posibles errores de precisión. Esto hace que se produzcan dispersiones que, dependiendo de su magnitud, pueden o no facilitar la interpretación de un polo o un círculo máximo. De ser así y producirse una gran dispersión de datos, será preciso recurrir a un análisis estadístico de una muestra grande de datos con el fin de determinar la dirección y buzamiento predominantes (*Cuadro N° 06*). Este análisis estadístico no se puede realizar mediante la proyección estereográfica ya que se producirá una gran concentración de puntos en la parte central del diagrama (*Cuadro N°06.b*). Para



realizar este análisis se recurre a la proyección equiareal, empleando la falsilla de Schmidt, que nos permite el recuento directo de los polos, calcular su valor estadístico por unidad de superficie y determinar las direcciones y buzamiento predominantes (*Cuadro N°06.a*) (Rosas, 2007).



**Figura 5.** Diagrama de densidad de polos: a) en proyección equiareal y en proyección estereográfica (equiangular) (Tomado de Phillips, 1951).

- **Aplicaciones en geología estructural**

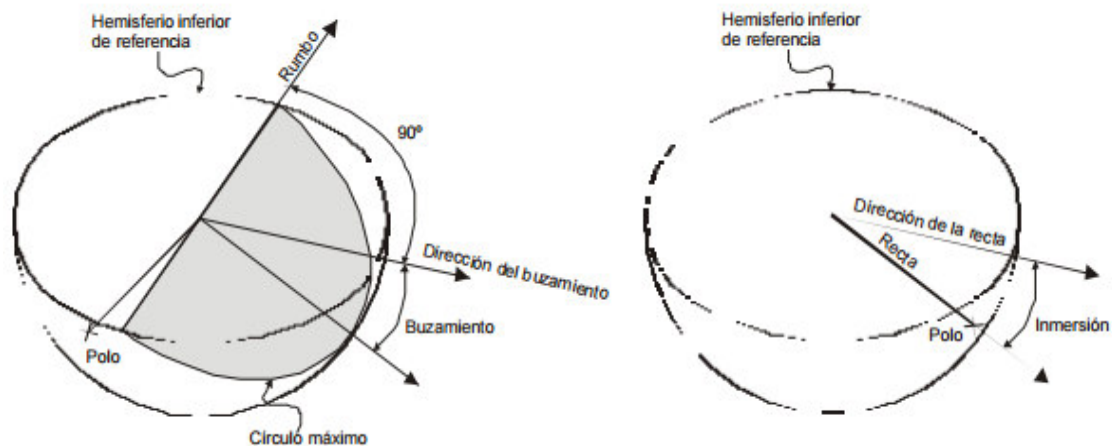
La proyección estereográfica permite la representación en elementos de geología estructural. Los datos empleados se toman en el campo, de forma directa, mediante el empleo de la brújula de geólogo (*Cuadro N°7 a.*). Esta posee una brújula convencional que nos permite tomar las direcciones de los diferentes elementos tomando como referencia el norte magnético y un clinómetro que facilita el ángulo que forma el elemento a medir con respecto al plano horizontal.



**Figura 6.** a) Brújula de geólogo. b) Afloramiento rocoso de margas con yesos.

Generalmente el desarrollo de los elementos no es perfecto como ocurre por ejemplo con las diaclasas. En la *Cuadro 7.b.* se observan juegos de diaclasas en materiales margocalizos que definen planos según direcciones preferentes subverticales (J1 y J2) y normales entre sí.

Cuando el elemento a medir es un plano, el ángulo de inclinación recibe en geología el nombre de buzamiento (dip), mientras que cuando se trata de una recta la inclinación recibe el nombre de inmersión (plunge) (Velásquez, 2013).



**Figura 7.** Elementos de un plano y una recta. (Tomado de Phillips, 1951).

- **Determinación de familias de diaclasas**

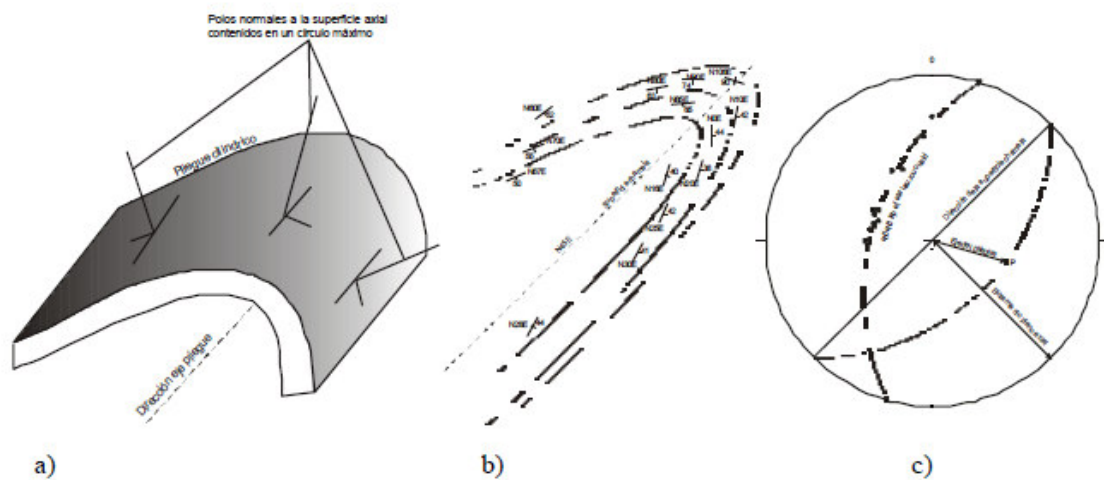
Para la determinación de los juegos de diaclasas o discontinuidades que afectan a un macizo rocoso suelen elaborarse diagramas pi de los planos de discontinuidad. Cuando la dispersión es muy pequeña, fácilmente podemos determinar los juegos que afectan al macizo situándonos sobre la zona de máxima densidad de puntos. Sin embargo, esto no siempre es así, ya que generalmente la dispersión es grande, debiendo recurrir a métodos estadísticos que nos permitan establecer las zonas de máxima concentración de polos.

Preparado el diagrama de polos se procede a contar su densidad, para lo cual suele ser conveniente, tal y como ya se ha comentado con anterioridad, el uso de la representación equiareal que permite un tratamiento estadístico de los datos. Tras el recuento estaremos en condiciones de trazar las curvas de distribución que nos mostrarán los lugares geométricos donde el número de polos es el mismo, obteniendo así el diagrama de densidad de polos, y estableciendo el polo de las

familias de diaclasas en los puntos de máxima concentración de polos (*Cuadro N°06*) (Velásquez, 2013).

- **Determinación del eje y del plano axial de un pliegue**

El eje de un pliegue (*Cuadro N°09.a*) puede calcularse con ayuda de la proyección estereográfica con tan sólo tomar una serie de medidas de orientaciones de los flancos del pliegue (*Cuadro N°09.b*). Representando los polos de estas orientaciones, bastará con trazar el plano que contenga estas direcciones y que corresponderá a un plano normal al eje del pliegue cuyo rumbo e inmersión vendrán dados por el polo del citado plano (*Cuadro N°09.c*) (Marquina, 2009). La superficie de charnela plana es paralela al plano axial, al igual que el eje del pliegue será paralelo al plano axial, por lo que trazando en el estereograma una dirección equivalente a la medida en el campo para la superficie de charnela y haciendo que él contenga al eje (P) habremos obtenido un plano paralelo a la charnela y que contenga el eje, es decir habremos obtenido el plano axial con su correspondiente buzamiento y dirección (Velásquez, 2013).



**Figura 8.** Determinación del eje y del plano axial de un pliegue cilíndrico con inmersión. (Tomado McClay, 1990).

## 2.5.4. PARAMETROS ESTADISTICOS

### 2.5.4.1. Medidas de Tendencia Central (M. Spiegel, S.F.)

#### ➤ **Media aritmética**

Medida descriptiva de tendencia central, llamada también promedio. Resulta de sumar los valores de todas las observaciones y dividir la sumatoria entre el total de ellas.

$$X = \frac{X1 + X2 + X3 + \dots + Xn}{n}$$

#### ➤ **Media geométrica**

Es la raíz enésima del producto de los valores de una serie. La media geométrica es un estadígrafo que no se deja influenciar mucho por los altos o bajos erráticos, por lo tanto es mucho más representativo de las poblaciones examinadas.

$$X = \sqrt[n]{X1.X2.X3.....Xn}$$

#### ➤ **Mediana**

Es el valor de la variable que divide el total de las “n” observaciones debidamente ordenadas en dos partes de igual tamaño. Esto significa que a uno o al otro lado de este valor mediano se encuentra no más del 50% del total de las observaciones. Es única, fácil de calcular y los valores extremos no afectan su valor.

#### ➤ **Moda**

Valor más frecuente en el conjunto. La moda puede no existir e incluso si existe puede ser única.

#### ➤ **Cuartiles**

Los cuartiles son estadígrafos de posición que dividen al total de las observaciones, debidamente ordenadas, en cuatro partes de igual tamaño. Sirve para describir el 50% central de las observaciones y en la elaboración del gráfico de caja (box plot).

#### ➤ **Percentiles**

Los percentiles son estadígrafos de posición donde 99 valores dividen a un conjunto de datos en 100 partes iguales, indicando el porcentaje de la distribución igual o

menor a su valor. El percentil 95 es utilizado para determinar anomalías geoquímicas cuando tenemos una distribución errática.

#### **2.5.4.2. Medidas de Dispersión (L. Marconi y A. D'Amelio, S.F.)**

Estos parámetros mide la variabilidad de un conjunto de datos.

##### ➤ **Rango**

Corresponde a la diferencia entre el mayor y el menor de nuestras observaciones, claramente influenciado por valores extremos.

$$\text{Rango} = \text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}$$

El intervalo de una clase es la amplitud dividida entre el número de clases.

$$\text{Intervalo} = (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) / N^{\circ} \text{ de clases}$$

##### ➤ **Varianza**

Es la medida que cuantifica la variabilidad de los datos respecto al valor de la media. Si los valores están muy concentrados las desviaciones respecto a la media serán muy pequeños y en consecuencia también sus cuadrados, se evita que las desviaciones positivas se compensen con las negativas.

$$s^2 = \frac{\sum (X - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Pero desde este punto de vista, la varianza tiende a exagerar los verdaderos valores respecto a la media, bajo esta alternativa para medir la dispersión y que atenúe dicho efecto se utiliza la desviación estándar.

##### ➤ **Desviación Estándar**

Es la raíz cuadrada positiva de la varianza. Mide la variabilidad de los datos en las unidades en que se midieron originalmente, sirve para definir la dispersión de los datos alrededor de la media.

Es el valor crítico necesario para establecer las variaciones locales, regionales y las posibles anomalías.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X - x)^2}{n - 1}}$$

La desviación estándar puede ser distinta en ambientes que tengan la misma media. Según la estadística clásica, en una población normal, el 68.26% de la población tendrá valores entre  $\bar{X}$  y  $\bar{X} + s$ , el 95.44% valores entre  $\bar{X}$  y  $\bar{X} + 2s$ , y el 99.74% valores entre  $\bar{X}$  y  $\bar{X} + 3s$ . Esto quiere decir que en una medida, estos porcentajes son exactos solamente cuando la población sigue la distribución normal perfecta. En caso que tenga una ligera asimetría los porcentajes serán aproximados.

#### ➤ **Rango Intercuartílico**

Es la diferencia entre el tercer cuartíl y el primero. El rango intercuartílico puede considerarse como una alternativa de la desviación típica para calcular la dispersión de los elementos.

$$RI = (Q3 - Q1)$$

#### ➤ **Coefficiente de Variación**

Se usa para comparar la variabilidad entre dos o más muestras medidas en las mismas unidades o no, es decir es más homogénea o presenta menos discrepancia aquella distribución que tiene el menor coeficiente de variación.

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \text{ o } CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100$$

Una distribución puede considerarse como Gaussiana o normal si el coeficiente de variación es menor a 0.5, en caso contrario indicaría un carácter log-normal.

### **2.5.4.3. Coeficientes de la Forma de Distribución**

#### ➤ **Curtosis**

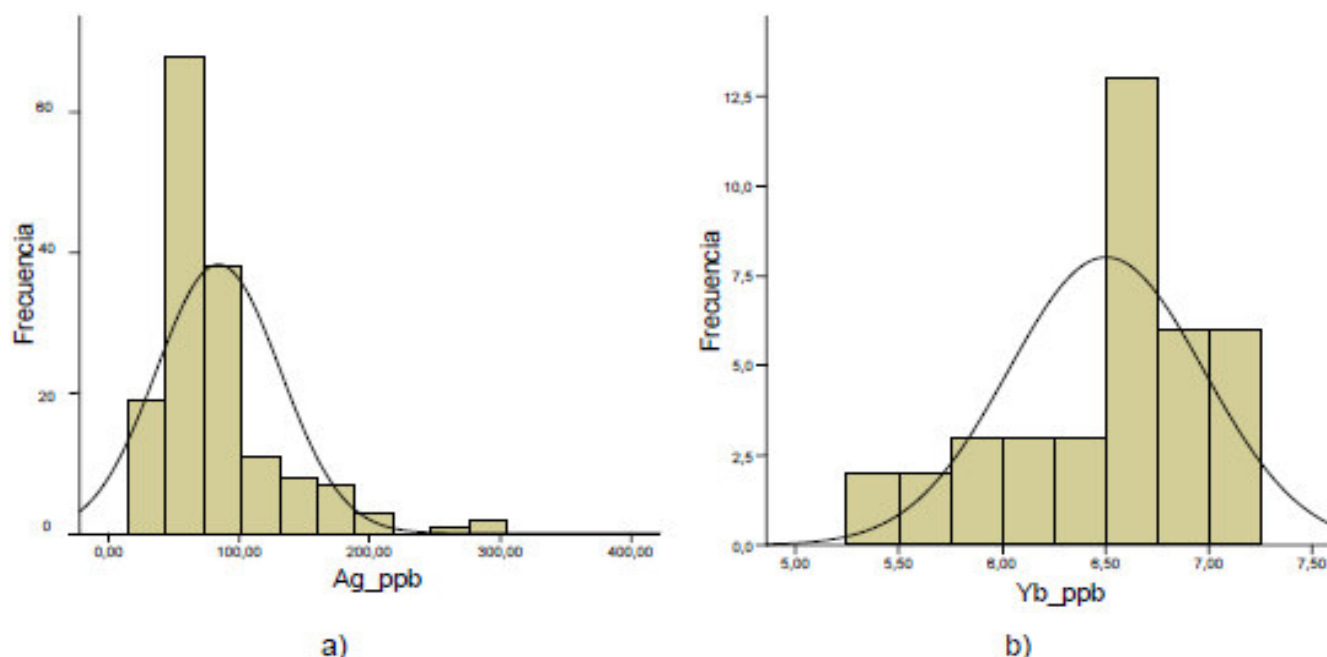
Mide la concentración de la distribución entorno a la media, si la variable es normal el valor del coeficiente es cero. Valores mayores que cero indicarán que la distribución tiende a concentrarse en torno a la media más que una distribución normal, mientras que valores menores que cero indicarán que tienden a desplazarse.

### ➤ **Asimetría**

Es una medida de la simetría de la distribución de los valores respecto a la media. Valores mayores que cero indicarán que las desviaciones respecto a la media son mayores para los valores superiores (sesgo positivo), mientras que valores menores que cero indicarán que las desviaciones respecto a la media son mayores para los valores inferiores (sesgo negativo).

Cuando se diseña la distribución geoquímica de un ambiente natural sobre escalas lineales se obtiene una curva asimétrica positiva y negativa siendo el primer caso la más común dentro de nuestra investigación.

Sin embargo si se trazara la distribución de la misma población sobre la ordenada a la escala lineal en función del valor geoquímico midiéndose sobre la abscisa a escala logarítmica, la curva resultante se aproximaría a la forma de una campana simétrica, pero alrededor de una media geométrica en vez de una media aritmética como es el caso de una distribución normal, este es el proceso de “transformación logarítmica”. (Vásquez, 2009).



**Figura 9.** a) Sesgo positivo; b) Sesgo negativo

### III. CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS Y PETROGRÁFICAS

En la naturaleza existen numerosas especies minerales y rocas, clasificadas en doce y tres grupos, respectivamente; sin embargo, se prospestarán aquellas unidades metalotectas o unidades industriales, y aquellos alimentadores causantes de la mineralización.

En los trabajos de prospección y exploración, nos encontraremos identificando constantemente distintos tipos de minerales, por ejemplo: minerales formadores de rocas, minerales de alteración hidrotermal, minerales de mena y ganga, etc.

Este reconocimiento de minerales y rocas es determinante al efectuar las características geológicas, representado en el cartografiado geológico, logueo de los testigos de perforación, etc.

#### 3.1. ÍNDICE MINERAL

En las páginas siguientes se muestra la descripción de unos 478 minerales, que incluye los minerales comúnmente usados y los de mayor importancia económica.

En la descripción de cada individuo se han considerado la composición química, sistema de cristalización, densidad y dureza.

NOMBRE	COMPOSICIÓN	Cx.	Densidad	Dz.	OBSERVACIONES
Acantita	$\text{Ag}_2\text{S}$	Mon	7.2-7.3	2-2½	Baja temperatura; $\text{Ag}_2\text{S}$ , 87% Ag.
Acroíta					Turmalina incolora.
Acmita	$\text{NaFe}(\text{SiO}_3)_2$	Mon	3.40-3.55	6-6½	Un tipo de piroxeno.
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Mon	3.0-3.2	5-6	Tremolita con >2% Fe.
Adularia					Ortoclase clara.
Ágata					Calcedonia bandeada.
Alabandita	$\text{MnS}$	Iso	4	3½-4	Negra.
Alabaster					Masivo
Albita	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Tric	2.62	6	Plagioclase rica en Na.
Alexandrita					Gema crisoberilo.
Allanita	$(\text{Ce,Ca,Y})(\text{Al,Fe})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	Mon	3.5-4.2	5½-6	
Allemontita	$\text{AsSb}$	Hex	5.8-6.2	3-4	Presenta un solo clivaje.



Almandita	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Iso	4.25	7	Granate rojo
Alofano	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amf	1.85-1.89	3	Mineral arcilloso.
Altaíta	PbTe	Iso	8.16	3	Estaño blanco, raro.
Alunita	$\text{K Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	Rom	2.6-2.8	4	11.4% $\text{K}_2\text{O}$ , 37% $\text{Al}_2\text{O}_3$
Amatista					Cuarzo púrpura.
Amazonita					Microclina verde (variedad).
Ambligonita	$(\text{Li}, \text{Na})\text{AlPO}_4(\text{F}, \text{OH})$	Tric	3.0-3.1	6	Acerca de un 10% $\text{Li}_2\text{O}$ , 48% $\text{P}_2\text{O}_5$
Amosita					Asbestos de antofilita.
Analcima	$\text{Na}(\text{AlSi}_2\text{O}_6) \cdot \text{H}_2\text{O}$	Iso	2.27	5-5½	Zeolita.
Anatasa	$\text{TiO}_2$	Tet	3.9	5½-6	Baja temperatura $\text{TiO}_2$
Anauxita		Mon	2.6	2	Si-rico kaolinita.
Andalusita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Ort	3.16-3.20	7½	Algunas veces prismas cuadrados; 63% $\text{Al}_2\text{O}_3$
Andesina	$\text{Ab}_{70}\text{An}_{30} - \text{Ab}_{50}\text{An}_{50}$	Tric	2.69	6	Plagioclase feldespática.
Andradita	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	Iso	3.75	7	Granate de calcio-fierro.
Anfibolitas					Mirar actinolitas, Antofilita, Arfvedsonita, Cummingtonita, Hornblenda, Tremolita.
Anglesita	$\text{PbSO}_4$	Ort	6.2-6.4	3	Algunas veces bandeado, 68% de Pb.
Anhidrita	$\text{CaSO}_4$	Ort	2.89-2.98	3-3½	41% de $\text{CaO}$ .
Ankerita	$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	Rom	2.95-3	3½	Dolomita con $\text{Fe} > \text{Mg}$ .
Annabergita	$(\text{Ni}, \text{CO})_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon	3	2½-3	Nickel bloom. 29% Ni, 25% As
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Tric	2.76	6	Plagioclase rica en Ca
Anortoclase	$(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	Tric	2.58	6	Como la Ortoclase con $\text{Na} > \text{K}$ .
Antigorita					Tipo de serpentina.
Antimonio	Sb	Rom	6.7	3	
Antlerita	$\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$	Ort	3.9	3½-4	Mineral secundario de cobre de regiones áridas.
Antofilita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Ort	2.85-3.2	5½-6	Anfíbol marrón, asbesto.
Apatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$	Hex	3.15-3.20	5	38-42% de $\text{P}_2\text{O}_5$ .
Apofilita	$\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{F}, \text{OH}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tet	2.3-2.4	4½-5	Mineral secundario en lavas básicas.
Aguamarina					Beril azul-verde pálido
Aragonita	$\text{CaCO}_3$	Ort	2.95	3½-4	Cl (010), (110). 56% $\text{CaO}$
Arfvedsonita	$\text{Na}_2 \cdot 3(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Mon	3.45	6	Anfibolita de Na.
Argentita	$\text{Ag}_2\text{S}$	Iso	7.3	2-2½	87% de Ag.
Arsénico	As	Rom	5.7	3½	
Arsenopirita	$\text{FeAsS}$	Mon	5.9-6.2	5½-6	Pseudo-orth. 46% de As.
Asbestos					Ver Amosita, Antofilita, Crisotilo, Crocidolita, Tremolita.
Asbolita	Cobalto wad	Amf	2.9-4.3		Un 15% de Co.
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	Ort	3.75-3.77	3-3½	Cl (010). 59% Cu
Augita	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$	Mon	3.2-3.4	5-6	Piroxeno común.

Auricalcita	$(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Mon	3.2-3.7	2	14-23% de Cu, 36-47% de Zn.
Autunita	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$	Tet	3.1-3.2	2-2½	Amarillo - verde, fluorescente, 67% de $\text{U}_3\text{O}_8$
Awaruita	$\text{FeNi}_2$	Iso	8	4-5	Magnético.
Axinita	$(\text{Ca,Mn,Fe})_3\text{Al}_2\text{BSi}_4\text{O}_{15}(\text{OH})$	Tric	3.27-3.35	6½-7	Cristales con ángulos agudos.
Azufre	S	Ort	2.05-2.09	1½-2½	Arde con llamarada azul.
Azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	Mon	3.77	3½-4	Siempre azul con 55% de Cu.
<b>B</b>					
Baddeleyita	$(\text{Zr,Hf})\text{O}_2$	Mon	5.5-6	6.5	Zirconio en menor proporción.
Balas rubí					Espinela de gema roja.
Barita	$\text{BaSO}_4$	Ort	4.5	3-3½	Cl (00l), (110). 65.7% BaO
Bastnaesita	$(\text{Ce,L a})(\text{CO}_3)(\text{F,OH})$	Hex	4.9-5.2	4-4½	75% REO.
Bauxitas					Mezclas de minerales de hidróxido de aluminio.
Beidellita	$\text{Al}_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{12} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Ort?	2.6	1½	Montmorillonita rica en Al.
Bentonita					En gran parte montmorillonítico.
Berilo	$\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$	Hex	2.75-2.8	7½-8	14% BeO
Biotita	$\text{K}(\text{Mg,Fe}^{2+})_3(\text{Al,Fe}^{3+})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Mon	2.8-3.2	2½-3	Conocido como mica negra.
Bismita	$\text{Bi}_2\text{O}_3$	Mon	8	4½	72% Bi.
Bismutinita	$\text{Bi}_2\text{S}_3$	Ort	6.75-6.81	2	Cl (010). 81% Bi
Bismutita	$(\text{BiO}_2)\text{CO}_3$	Tet	6.1-7.7	2½-3½	75% Bi
Bismuto	Bi	Rom	9.8	2-2½	Cl (0001).
Boehmita	$\text{AlO}(\text{OH})$	Ort	3.01-3.06		En bauxitas 85% $\text{Al}_2\text{O}_3$
Boracita	$\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$	Ort	2.9-3.0	7	62% $\text{B}_2\text{O}_3$
Borax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Mon	1.7	2-2½	Cl (100). 36.5% $\text{B}_2\text{O}_3$
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	Iso	5.06-5.08	3	Pátina azul-morado. 63.3% Cu
Boulangerita	$\text{Pb}_5\text{Sb}_4\text{S}_{11}$	Ort	6-6.3	2½-3	55% Pb, 25% Sb
Bournonita	$\text{PbCuSbS}_3$	Ort	5.8-5.9	2½-3	13% Cu, 42% Pb, 25% Sb.
Brannerita	$(\text{U,Ca,Ce})(\text{Ti,Fe})_2\text{O}_6$		4.5-5.4	4½	30-50% $\text{U}_3\text{O}_8$
Braunita	$3\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$	Tet	4.8	6-6½	64% Mn
Bravoíta	$(\text{Ni,Fe})\text{S}_2$	Iso	4.66	5½-6	Gris acero con 24% Ni.
Brocantita	$\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$	Mon	3.9	3½-4	Color verde con 56% Cu
Bromargirita	$\text{Ag}(\text{Br,Cl})$	Iso	6-6.5	2½	57-65% Ag
Bronzita	$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$	Ort	3.1-3.3	5½	Enstatita con 5-13% FeO
Brookita	$\text{TiO}_2$	Ort	3.9-4.1	5½-6	Brillo diamantino.
Brucita	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	Rom	2.39	2½	Cl (0001). 69% MgO
Bytownita	$\text{Ab}_{30}\text{An}_{70}-\text{Ab}_{10}\text{An}_{90}$	Tric	2.74	6	Plagioclase feldespática.
<b>C</b>					
Cairngorm					Cuarzo ahumado a negro.
Calamina					Hemimorfita.
Calaverita	$\text{AuTe}_2$	Mon	9.35	2½	42% Au
Calcantita	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Tric	2.12-2.30	2½	Soluble en agua, 35% Cu.

Calcedonia			2.6-2.64		Cuarzo criptocristalino.
Calcita	$\text{CaCO}_3$	Rom	2.72	3	Fluorescente, Cl (1011).
Calcocita	$\text{Cu}_2\text{S}$	Ort	5.5-5.8	2½-3	Imperfectamente séctil con 79.8% Cu
Californita					Tipo de gema.
Calomel	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2$	Tet	7.2	1½	85% Hg.
Cancrinita	$(\text{Na}_2, \text{Ca})_4(\text{AlSiO}_4)_6\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Hex	2.45	5-6	Feldespatoides.
Carnallita	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Ort	1.6	1	16.8% $\text{K}_2\text{O}$ , 14.6% $\text{MgO}$ .
Carneliana					Calcedonia roja.
Carnotita	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Ort	4.1	1	50% $\text{U}_3\text{O}_8$ , 20% $\text{V}_2\text{O}_5$
Casiterita	$\text{SnO}_2$	Tet	6.8-7.1	6-7	Brillo diamantino; 78.6% Sn
Celestita	$\text{SrSO}_4$	Ort	3.95-3.97	3-3½	56% $\text{SrO}$
Celsiana	$\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	Mon	3.37	6	Feldespatos con 41% $\text{BaO}$
Cerargirita	$\text{Ag}(\text{Cl}, \text{Br})$	Iso	5.5-6	2½	Perfectamente séctil 65-75% Ag.
Cerusita	$\text{PbCO}_3$	Ort	6.55	3-3½	Efervesce con $\text{HNO}_3$ ; 77% Pb.
Cervantita	$\text{Sb}_2\text{O}_4$	Ort?	4-5	4-5	79% Sb
Chabazita	$\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Rom	2.05-2.15	4-5	Cúbico como cristales de zeolita.
Chalcopirita	$\text{CuFeS}_2$	Tet	4.1-4.3	3½-4	31-34.5% Cu
Chalcotriquita					Cuprita fibrosa.
Chalibita					Siderita
Chert	$\text{SiO}_2$		2.65	7	Cuarzo criptocristalino.
Cinabrio	$\text{HgS}$	Rom	8.1	2½	Raya roja, 86% Hg.
Cleavelandita					Albita blanca-plateada.
Clinoclasa	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)(\text{OH})_3$	Mon	4.38	2½-3	Mineral secundario.
Clinoclorita					Variedad de la clorita.
Clinoenstatita	$(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3$	Mon	3.19	6	Forma monoclinica de la Enstatita.
Clinoferrosilita	$(\text{Fe}, \text{Mg}) \text{SiO}_3$	Mon	3.6	6	Piroxeno
Clinohumita	$\text{Mg}_9\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{F}, \text{OH})_2$	Mon	3.1-3.2	6	Grupo de la Condrodita.
Clinozoisita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	Mon	3.25-3.37	6-6½	Cristales estriados.
Clorita	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_6\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	Mon	2.6-2.9	2-2½	Diferenciados por análisis químico, Clinocloro, Penninita y Proclorita.
Cloritoide	$\text{Fe}_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	Mon	3.5	6-7	Mica quebradiza.
Cobaltita	$\text{CoAsS}$	Iso	6.33	5½	En piritoedros; 29-35% Co, 43-45% As.
Cobre	$\text{Cu}$	Iso	8.9	2½-3	Maleable.
Cofinita	$\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	Tet	7.2		Mineral negro de uranio en sedimentos.
Colemanita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.42	4-4½	Cl (010) perfect. 50.9% $\text{B}_2\text{O}_3$
Columbita	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	Ort	5.2-6.7	6	Brillo submetálico, 31-79% $\text{Nb}_2\text{O}_5$
Condrodita	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$	Mon	3.1-3.2	6-6½	Especiales similares, Humita, Norbergita.

Cordierita	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	Ort	2.60-2.66	7-7½	Encontrado en altos grados de metamorfismo.
Corindón	$\text{Al}_2\text{O}_3$	Rom	4.02	9	52.9% Al.
Covelita	$\text{CuS}$	Hex	4.6-4.76	1½-2	Azul, 66.4% Cu.
Criolita	$\text{Na}_3\text{AlF}_6$	Mon	2.95-3.00	2½	Blanco, 54.4% F.
Crisoberilo	$\text{BeAl}_2\text{O}_4$	Ort	3.65-3.8	8½	Cristales tabulares, 19.8% BeO.
Crisocola	$\text{Cu}_2\text{H}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$		2.0-2.4	2-4	Verde azulado, 36% Cu.
Crisolita					Olivino.
Crisoprasa					Calcedonia verde.
Crisotilo					Asbestos, serpentina.
Cristobalita	$\text{SiO}_2$		2.30		Cuarzo de alta T°, en rocas volcánicas (> 1470°C).
Crocidolita			3.2-3.3		Variedad de asbesto azul de Riebeckita.
Crocoita	$\text{PbCrO}_4$	Mon	5.9-6.1	2½-3	Raya anaranjada-roja, 23% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 64% Pb.
Cromita	$(\text{Fe,Mg})\text{O} \cdot (\text{Fe,Al,Cr})_2\text{O}_3$	Iso	4.3-4.6	5½	Brillo submetálico, marrón oscuro, 43-68% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	Rom	2.65	7	46.7% Si.
Cubanita	$\text{CuFe}_2\text{S}_3$	Ort	4.03-4.18	3½	23% Cu.
Cummingtonita	$(\text{Fe,Mg})_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Mon	3.1-3.6	6	Anfíbol
Cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	Iso	6	3½-4	Raya marrón rojizo (teja), 88.8% Cu.
<b>D</b>					
Danita	$(\text{Fe,Co})\text{AsS}$	Mon	5.9-6.2	5½-6	Arsenopirita de cobalto, 12% Co.
Danburita	$\text{CaB}_2(\text{SiO}_4)_2$	Ort	2.97-3.02	7	Cristalizado, 28.4% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Datolita	$\text{CaB}(\text{SiO}_4)(\text{OH})$	Mon	2.8-3.0	5-5½	Usualmente en cristales, 21.8% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Demantoide					Gema verde de Andradita.
Diamante	$\text{C}$	Iso	3.5	10	Fluorescente
Diáspora	$\text{AlO}(\text{OH})$		3.35-3.45	6½-7	85% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Dickita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Mon	2.6	2-2½	Grupo de arcillas del caolín.
Digenita	$\text{Cu}_9\text{S}_5$	Iso	5.6	2½-3	Junto a calcosita, 75-79% Cu.
Diopsido	$\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$	Mon	3.2-3.3	5-6	Piroxeno.
Dioplasa	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$		3.3	5	Esmeralda verde.
Distena					Kyanita.
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Rom	2.85	3½-4	Cl (1011). 30.4% CaO, 21.7% MgO, 54.3% CaCO <sub>3</sub> .
Dumortierita	$(\text{Al,Fe})_7\text{O}_3(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)_3$	Ort	3.26-3.36	7	Fibrosa.
<b>E</b>					
Edenita	$\text{Ca}_2\text{NaMg}_5(\text{AlSi}_7\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Mon	3	6	Color hierro pálido.
Egirina					Acmita impura.
Electrum	$\text{Au,Ag}$	Iso	13.5-17.5	3	Aleación natural de Au-Ag con >20% Ag.

Embolita	Ag(Cl,Br)	Iso	5.6	1-1½	Intermedio entre cerargirita y bromirita.
Enargita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	Ort	4.43-4.45	3	Cl (110). 48.3% Cu, 19.1% As
Endlichita					Vanidinita arsénica, As reemplazado por V.
Enstatita	MgSiO <sub>3</sub>	Ort	3.2-3.5	5½	Piroxeno.
Epídota	Ca <sub>2</sub> (Al,Fe) <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>12</sub> (OH)	Mon	3.35-3.45	6-7	Cl (001)
Epsomita	MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Ort	1.75	2-2½	Sabor amargo; 16.3% MgO.
Eritrina	Co <sub>3</sub> (AsO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ·8H <sub>2</sub> O	Mon	2.95	1½-2½	Cobalto rosado; 37% Co.
Escapolita	Marialita-meionita series	Tet	2.65-2.74	5-6	Fluorescente.
Escolecita	Ca(Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ) <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O	Mon	2.16-2.4	5-5½	Tipo de zeolita.
Escorodita	FeAsO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Ort	3.1-3.3	3½-4	De color verde a marrón con un 32% As.
Escorzalita	(Fe,Mg)Al <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	Mon	3.35	5½-6	Miembro de la serie de lazulitas.
Escuterudita	(Co,Ni,Fe)As <sub>3</sub>	Iso	6.1-6.9	5	11-21% Co, 73-79% As, 0-9% Ni
Esfalerita	(Zn,Fe)S	Iso	3.9-4.1	3½-4	38-67% Zn, max. 5% Cd.
Esfena	CaTiO(SiO <sub>4</sub> )	Mon	3.40-3.55	5-5½	Cristales en forma de cuña, 40% TiO <sub>2</sub> .
Esmaltita					Variedad de Escuterudita, 13-24% Co, 63-71% As, 1-15% Ni.
Esmeralda					Gema verde de Berilo.
Esperrilita	PtAs <sub>2</sub>	Iso	10.5	6-7	54% Pt.
Espesartita	Mn <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Iso	4.18	7	Granate de color rojo a marrón.
Espodumena	LiAl(Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	Mon	3.15-3.20	6½-7	Tipo de piroxeno, 8% Li <sub>2</sub> O.
Estannita	Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub>	Tet	4.4	4	Fácilmente fusible, 29-31% Cu, 27% Sn, 12-14% Fe.
Estaño	Sn	Tet	7.3	2	Muy raro.
Estauroлита	(Fe,Mg) <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>23</sub> (OH)	Ort	3.65-3.75	7-7½	En cristales gemelos cruciformes.
Estefanita	Ag <sub>5</sub> SbS <sub>4</sub>	Ort	6.2-6.3	2-2½	68.5% Ag, 15.2% Sb.
Esternbergita	AgFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Ort	4.1-4.2	1-1½	34% Ag, 35% Fe.
Estibinita	Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Ort	4.52-4.62	2	71.7% Sb.
Estilbita	NaCa <sub>2</sub> Al <sub>5</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>36</sub> ·14H <sub>2</sub> O	Mon	2.1-2.2	3½-4	Un tipo de Zeolita.
Estilwelita	(Ce,La,Ca)BSiO <sub>5</sub>	Rom	4.57		4.57 58% REO, 11% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Estolzita	PbWO <sub>4</sub>	Tet	8.3-8.4	2½-3	45% Pb, 50% WO <sub>3</sub>
Estromeyerita	(Cu,Ag)S	Ort	6.2-6.3	2½-3	53% Ag, 31% Cu.
Estrontianita	SrCO <sub>3</sub>	Ort	3.7	3½-4	Efervesce en HCl. 90% SrO.
Euclasa	BeAlSiO <sub>4</sub> (OH)	Mon	3.1	7½	Cl (010). 17% BeO
Eucryptita	LiAlSiO <sub>4</sub>	Hex	2.67		Fluorescente.
Euxenia	AB <sub>2</sub> O <sub>6</sub> , A = Y, Ce, Ca, U, Th; B = Ti, Nb, Ta, Fe	Ort	5-5.9	5½-6½	22-30% REO, max. 8% U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> , 30-50% (Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ).
<b>F</b>					
Fayalita	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ort	4.14	6½	Olivino de hierro.

Fenacita	$\text{Be}_2\text{SiO}_4$	Rom	2.97-3.00	7½-8	En pegmatitas, 45.6% BeO.
Ferberita	$\text{FeWO}_4$	Mon	7.5	5	Serie de las wolframitas, 76.3% $\text{WO}_3$ .
Fergusonita	$(\text{RE}, \text{Fe})(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})\text{O}_4$	Tet	4.2-5.8	5½-6½	Max. 46% REO, 10% $\text{U}_3\text{O}_8$ , 54% $\text{Nb}_2\text{O}_5$
Ferrimolibdita	$\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3 \cdot 8\text{H}_2\text{O}?$	Ort?	3	1½	39% Mo.
Ferrosilita	$\text{FeSiO}_3$	Ort	3.6	6	Piroxeno.
Filipsita	$(\text{K}_2, \text{Na}_2, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4.5 \text{H}_2\text{O}$	Mon	2.2	4½-5	Variedad de la Estilbita.
Flogopita	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{F})_2$	Mon	2.86	2½-3	Mica marrón
Florencita	$\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$	Hex	3.6	5	Amarillo pálido.
Fluorita	$\text{CaF}_2$	Iso	3.18	4	Cl octahedral, fluorescente, 48.9% F.
Forsterita	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	Ort	3.2	6½	Olivino de magnesio.
Fosfuranilita	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Tet		2½	De color amarillo, mineral secundario de U.
Fosgenita	$\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$	Tet	6.0-6.3	3	Fácilmente fusible, 75% Pb.
Franklinita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn}, \text{Mn}^{2+})(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+})_2\text{O}_4$	Iso	5.15	6	Raya color marrón oscuro., 5-19% Zn.
Freibergita					Tetrahedrita argentífera.
Fuchcita	$\text{K}(\text{Al}, \text{Cr})_2(\text{Al}, \text{CrSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Mon	2.76-2.88	2-2.5	Muscovita rica en Cr.
<b>G</b>					
Gadolinita	$\text{Be}_2\text{FeY}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$	Mon	4.0-4.5	6½-7	Nom. 48% REO, 10% BeO
Gahnita	$\text{ZnAl}_2\text{O}_4$	Iso	4.55	7½-8	Espinela de Zn, octahedros verdes.
Galaxita	$\text{MnAl}_2\text{O}_4$	Iso	4.03	7½-8	Espinela de Mn.
Galena	$\text{PbS}$	Iso	7.4-7.6	2½	Cl cubico 86.6% Pb
Garnierita	$(\text{Ni}, \text{Mg})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4?$	Amf	2.2-2.8	2-3	Color verde; 25-30% Ni.
Gaylussita	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$		1.99	2-3	Fácilmente fusible, 20% $\text{Na}_2\text{O}$ .
Geocronita	$\text{Pb}_5(\text{Sb}, \text{As})_2\text{S}_8$	Ort	6.3-6.5	2½	69% Pb, 8% Sb, 5% As.
Gersdorffita	$\text{NiAsS}$	Iso	5.9	5½	35% Ni, 45% As.
Geyserita					Opalo de yacimientos "Hot spring"
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	Mon	2.3-2.4	2½-3½	65.4% $\text{Al}_2\text{O}_3$
Glauberita	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	Mon	2.70-2.85	2½-3	22% $\text{Na}_2\text{O}$
Glaucofana	$\text{Na}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Mon	3.0-3.2	6-6½	Anfíbol de Na.
Glaucionita	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg})_2(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Mon	2.3	2	Mica arenosa verde de sedimentos marinos.
Gmelinita	$(\text{Na}_2, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Rom	2.04-2.17	4½	Variedad de Chabazita.
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	Ort	4.37	5-5½	Cl (010), 62% Fe
Goslarita	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Ort	1.98	2-2½	Soluble en agua; 22% Zn
Grafito	C	Hex	2.3	1-2	Negro a plateado.
Granates	$\text{A}_3\text{B}_2(\text{SiO}_4)_3$ , A = Ca, Mg, $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Mn}^{2+}$ ; B = Al, $\text{Fe}^{3+}$ , $\text{Mn}^{3+}$ , Cr.	Iso	3.5-4.3	6½-7½	Almandino, Andradita, Grossularia, Pirope, Espessartita, Uvarovita.
Greenockita	$\text{CdS}$	Hex	4.9	3-3½	Amarillo-naranja; 77.58% Cd.
Grossularia	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Iso	3.53	6½	Un tipo de granate.

Grupo del Kaolín					Familia de minerales de arcilla, ver Anauxita, Dickita, Kaolinita, Nacrita.
Gummita	$\text{UO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$		3.9-6.4	2½-5	Nombre de campo para los Ox de U, 60-80% $\text{U}_3\text{O}_8$
<b>H</b>					
Halita	$\text{NaCl}$	Iso	2.16	2½	53% $\text{Na}_2\text{O}$ equiv.
Halloysita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amf	2.0-2.2	1-2	Mineral de arcilla.
Harmotoma	$(\text{Ba}, \text{K})(\text{Al}, \text{Si})_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.45	4½	Grupo de la zeolita.
Hastingsita	$(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Mon	3.2	6	Serie de la hornblenda.
Hausmannita	$\text{Mn}_3\text{O}_4$	Tet	4.84	5½	72% Mn.
Hauynita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{4-8}\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24} \cdot (\text{SO}_4, \text{S})_{1-2}$	Iso	2.4-2.5	5½-6	Un tipo de feldespatoide.
Heazlewoodita	$\text{Ni}_3\text{S}_2$		4.6	5	Amarillo metálico, 73% Ni.
Hectorita	$(\text{Mg}, \text{Li})_6\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4$	Mon	2.5	1-1½	Montmorillonita de Li.
Hedenbergita	$\text{CaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	Mon	3.55	5-6	Miembro final de la serie de los diópisodos.
Helvita	$(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Zn})_4\text{Be}_3(\text{SiO}_4)_3\text{S}$	Iso	3.16-3.36	6-6½	En pegamatitas.
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Rom	5.26	5½-6½	Raya color rojo parda, 70% Fe.
Hemimorfita	$\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Ort	3.4-3.5	4½-5	Cl (110). 54% Zn.
Hercinita	$\text{FeAl}_2\text{O}_4$	Iso	4.39	7½-8	Espinela de hierro.
Hessita	$\text{Ag}_2\text{Te}$	Iso	8.4	2½-3	Gris
Heulandita	$(\text{Na}, \text{Ca})_{4-6}\text{Al}_6(\text{Al}, \text{Si})_4\text{Si}_6\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.18-2.20	3½-4	Una zeolita.
Hialita					Globular, ópalo incoloro.
Hialofana	$(\text{K}, \text{Ba})\text{Al}(\text{Al}, \text{Si})_3\text{O}_8$	Mon	2.8	6	Ortoclasa enriquecida en Ba.
Hiddenita					Espodumena verde.
Hidromica					Illita
Hidrocincita	$\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$	Mon	3.6-3.8	2-2½	Mineral secundario; 59% Zn.
Hielo	$\text{H}_2\text{O}$	Hex	0.19	1½	
Hiperstena	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$	Ort	3.4-3.5	5-6	Un tipo de piroxeno.
Hornblenda	$\text{Ca}_2\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_4(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})\text{AlSi}_8\text{O}_{22}(\text{O}, \text{OH})_2$	Mon	3.2	5-6	Anfíbol común.
Huebnerita	$\text{MnWO}_4$	Mon	7	5	Serie de las wolframitas.
Humita	$\text{Mg}_7(\text{SiO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})_2$	Ort	3.1-3.2	6	Grupo de la Condrodita.
<b>I</b>					
Iddingsita	$\text{H}_8\text{Mg}_9\text{Fe}_2\text{Si}_3\text{O}_{14}?$	Ort	3.5-3.8	3	
Idocrasa	$\text{Ca}_{10}(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4(\text{SiO}_4)_5(\text{Si}_2\text{O}_7)_2(\text{OH})_4$	Tet	3.35-3.45	6½	Presenta cristales prismáticos.
Illita	Silicato hidratado de Al, K, Ca, Mg				Mica como la arcilla, 38% $\text{Al}_2\text{O}_3$
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$	Rom	4.7	5½-6	Ligeramente magnético, 52.6% $\text{TiO}_2$
Ilmenorutila	$(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})_3\text{O}_6$		5.1	6-6.5	Negra.
Ilvaite	$\text{CaFe}^{2+}2\text{Fe}^{3+}(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$	Ort	4	5½-6	De color negro a marrón.
Indicolita					Turmalina azulina oscura.
Iodobromita	$\text{Ag}(\text{Cl}, \text{Br}, \text{I})$	Iso	5.7	1-1½	15% I, 60% Ag.
Iolita					Cordierita (variedad de gema).

Iridio	Ir	Iso	22.7	6-7	Metal platinoide.
Iridosmina	Ir, Os	Rom	19.3-21.1	6-7	Platinoide Max. 77% Ir, max. 80% Os.
<b>J</b>					
Jacinto					Zircón rojo-anaranjado.
Jacobita	MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Iso	4.75	5.5-6.5	Espinela magnética de color negro.
Jade					Mirar Nefrita y Jadeita.
Jadeita	Na(Al,Fe)Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Mon	3.3-3.5	6½-7	Prioxeno jade verde.
Jamesonita	Pb <sub>4</sub> FeSb <sub>6</sub> S <sub>14</sub>	Mon	5.5-6.0	2-3	50.8% Pb, 29.5% Sb
Jarosita	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	Rom	2.91-3.26	3	6-9% K <sub>2</sub> O
Jaspe					Cuarzo criptocristalino color rojo.
<b>K</b>					
Kainita	MgSO <sub>4</sub> .KCl.3H <sub>2</sub> O	Mon	2.1	3	19% K <sub>2</sub> O, 16% MgO
Kaliofilita	K(AlSiO <sub>4</sub> )	Hex	2.61	6	Dimorfo con Kalsilita 30% K <sub>2</sub> O, 32% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Kalsilita					Miembro final de la serie de las nefelinas.
Kaolinita	Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub>	Mon	2.6-2.65	2-2½	Terroso.
Kernita	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O	Mon	1.95	3	22.7% Na <sub>2</sub> O, 51% B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Krennerita	AuTe <sub>2</sub>	Ort	8.62	2-3	Clivaje Basal.
Kunzita					Espodumena rosada.
Kyanita	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Tric	3.56-3.66	5-7	De color azul, Cl (100) perfecto, marca fuerte anisotropía.
<b>L</b>					
Labradorita	Ab <sub>50</sub> An <sub>50</sub> -Ab <sub>30</sub> An <sub>70</sub>	Tric	2.71	6	Plagioclase feldespática.
Langbeinita	K <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	Iso	2.83	2½-3½	22.7% K <sub>2</sub> O, or 42% K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Lápiz lazuli					Lazurita impura.
Larsenita	PbZnSiO <sub>4</sub>	Ort	5.9	3	Olivino raro.
Laumontita	(Ca,Na)Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>12</sub> .4H <sub>2</sub> O	Mon	2.28	4	Un tipo de Zeolita.
Lawsonita	CaAl <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> )(OH) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	Ort	3.09	8	Encontrado en gneises y esquistos.
Lazulita	(Mg,Fe <sup>3+</sup> )Al <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub>	Mon	3.0-3.1	5-5½	Piedra preciosa color azul.
Lazurita	(Na,Ca) <sub>4</sub> (AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ,S,Cl)	Iso	2.4-2.45	5-5½	Tipo de feldespatoide.
Lechatelierita	SiO <sub>2</sub>	Amf	2.2	6-7	Sílice fundida.
Lepidocrocita	FeO(OH)	Ort	4.09	5	Junto a Goethita, 62% Fe.
Lepidolita	K(Li,Al) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	Mon	2.8-3.0	2½-4	Mica de litio con 5% Li <sub>2</sub> O.
Leucita	K(AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )	Iso?	2.45-2.50	5½-6	Tipo de feldespatoide.
Leucoxena	FeTiO <sub>3</sub> a TiO <sub>2</sub>		3.6-4.3		Color blanco, opaco causado por la alteración de Ilmenita.
Libethenita	Cu <sub>2</sub> (PO <sub>4</sub> )(OH)	Ort	4	4	53% Cu, 29% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Limonita	FeO(OH).nH <sub>2</sub> O	Amf	3.6-4.0	5-5½	Nombre de campo para los OH de hierro.
Linarita	PbCu(SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>2</sub>	Mon	5.3	2½	Azul marino; 15% Cu, 51% Pb.



Linneíta	$\text{Co}_3\text{S}_4$	Iso	4.8	$4\frac{1}{2}$ - $5\frac{1}{2}$	58% Co, to 7% Ni.
Litiofilita	$\text{Li}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{PO}_4$	Ort	3.5	5	9.5% $\text{Li}_2\text{O}$ , 45% $\text{P}_2\text{O}_5$
Loellingita	$\text{FeAs}_2$	Ort	7.4-7.5	$5$ - $5\frac{1}{2}$	72.8% As.
<b>M</b>					
Magnesiocromita	$(\text{Mg}, \text{Fe})(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$	Iso	4.2	$5\frac{1}{2}$	Miembro final de la serie de las cromitas. 21% $\text{MgO}$ , 79% $\text{Cr}_2\text{O}_3$
Magnesioferrita	$(\text{Mg}, \text{Fe})\text{Fe}_2\text{O}_4$	Iso	4.5	$5\frac{1}{2}$ -6	Tipo de espinela, 20% $\text{MgO}$ , 56% Fe
Magnesita	$\text{MgCO}_3$	Rom	3.0-3.2	$3\frac{1}{2}$ -5	Comúnmente masiva, 47.6% $\text{MgO}$ .
Magnetita	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Fe}_2\text{O}_4$	Iso	5.18	6	Fuertemente magnética, 72.4% Fe.
Malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Mon	3.9-4.03	$3\frac{1}{2}$ -4	Color verde, 57.3% Cu.
Manganita	$\text{MnO}(\text{OH})$	Ort	4.3	4	Cristales prismáticos, raya marrón oscuro, 62% Mn.
Manganosita	$\text{MnO}$	Iso	5.0-5.4	$5\frac{1}{2}$	77% Mn.
Manganotantalita	$(\text{Mn}, \text{Fe})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$	Ort	7.3	$4\frac{1}{2}$	Tantalita con Mn, Fe.
Marcasita	$\text{FeS}_2$	Ort	4.89	$6$ - $6\frac{1}{2}$	46.5% Fe
Margarita	$\text{CaAl}_2(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{16})(\text{OH})_2$	Mon	3.0-3.1	$3\frac{1}{2}$ -5	Como una mica quebradiza.
Marialita	$3\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \cdot \text{NaCl}$	Tet	2.7	$5\frac{1}{2}$ -6	Miembro final de la serie de escapolitas.
Marmatita					Esfalerita rica en Fe, 20% Fe.
Martita					Transición de la hematita a magnetita.
Meionita	$3\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot \text{CaCO}_3$	Tet	2.7	$5\frac{1}{2}$ -6	Miembro final de la serie de escapolitas.
Melaconita					Tenorita
Melanterita	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Mon	1.9	2	De color verde azulado.
Melilita	$(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Mg}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_7$	Tet	2.9-3.1	5	
Meneghinita	$\text{CuPb}_{13}\text{Sb}_7\text{S}_{24}$	Ort	6.36	$2\frac{1}{2}$	Familia de la Jamesonita.
Mercurio	Hg		13.6		Fluido, azogue.
Miargirita	$\text{AgSbS}_2$	Mon	5.2-5.3	$2\frac{1}{2}$	Raya cereza roja; 36% Ag, 41% Sb.
Microclino	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Tric	2.54-2.57	6	Feldespato K triclínico.
Microlita	$(\text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$	Iso	6.33	$5\frac{1}{2}$	Miembro final de la serie de pirocloros.
Millerita	$\text{NiS}$	Rom	5.3-5.7	$3$ - $3\frac{1}{2}$	Cristales capilares; 64.7% Ni.
Mimetita	$\text{Pb}_5\text{Cl}(\text{AsO}_4)_3$	Hex	7.0-7.2	$3\frac{1}{2}$	Similar a la piromorfita, 69% Pb, 15% As.
Minio	$\text{Pb}_3\text{O}_4$		8.9-9.2	$2\frac{1}{2}$	90% Pb.
Mispickel					Arsenopirita
Molibdenita	$\text{MoS}_2$	Hex	4.62-4.73	$1$ - $1\frac{1}{2}$	Plateado azulado, 60% Mo.
Monacita	$(\text{Ce}, \text{La}, \text{Y}, \text{Th})(\text{PO}_4, \text{SiO}_4)$	Mon	5.0-5.3	$5$ - $5\frac{1}{2}$	Max. 30% $\text{ThO}_2$ , max. 65% REO
Monticelita	$\text{CaMgSiO}_4$	Ort	3.2	5	Raro olivino.
Montmorillonita	$(\text{Al}, \text{Mg})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.5	$1$ - $1\frac{1}{2}$	Mineral de arcilla.
Morganita					Berilo rosado.

Mullita	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	Ort	3.23	6-7	Formado por andalusita caliente, Kyanita o Silimanita.
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{16})(\text{OH})_2$	Mon	2.76-3.1	2-2½	Mica común.
<b>N</b>					
Nacrita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	Mon	2.6	2-2½	Mineral de arcilla del grupo de los kaolines.
Nagiagita	$\text{Pb}_5\text{Au}(\text{Te,Sb})_4\text{S}_{5-8}$	Mon	7.4	1-1½	Mineral raro.
Natroalunita					Alunita con $\text{Na} > \text{K}$ .
Natrolita	$\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.25	5-5½	Tipo de zeolita.
Nefelina	$(\text{Na,K})\text{AlSiO}_4$	Hex	2.55-2.65	5½-6	Tipo de feldespatoides.
Nefrita					Jade, como una variedad de tremolita.
Niquel ferroso	$\text{Ni,Fe}$	Iso	7.8-8.2	5	En meteoritos, 5-15% Ni.
Nicolita	$\text{NiAs}$	Hex	7.78	5-5½	De color rojo cobre, 43.9% Ni.
Nitro	$\text{KNO}_3$	Ort	2.09-2.14	2	Salitre.
Nontronita	$\text{Fe}(\text{AlSi})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Mon	2.5	1-1½	Mineral arcilloso del grupo de las Montmorillonita.
Norbergita	$\text{Mg}_3(\text{SiO}_4)(\text{F,OH})_2$	Ort	3.1-3.2	6	
Noselita	$\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24} \cdot (\text{SO}_4)$	Iso	2.25-2.4	6	Tipo de feldespatoides.
<b>O</b>					
Octahedrita					Anatasa.
Oligoclasea	$\text{Ab}_{90}\text{An}_{10} - \text{Ab}_{70}\text{An}_{30}$	Tric	2.65	6	Plagioclasea feldespática.
Olivino	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$				(Series de Forsterite-Fayalite), así como Larsenita, Monticelita.
Onix					Calcedonia bandada.
Ópalo	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Amf	1.9-2.2	5-6	Fractura conchoidal.
Oro	$\text{Au}$	Iso	15.0-19.3	2½-3	Maleable y dúctil, color amarillo.
Oropimente	$\text{As}_2\text{S}_3$	Mon	3.49	1½-2	Amarillo, 61% As.
Ortoclasea	$\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Mon	2.57	6	Común feldespato K.
Ottrelita	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})(\text{Al,Fe}^{3+})\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot \text{H}_2\text{O}$	Mon	3.5	6-7	Cloritoide de Mn.
<b>P</b>					
Paladio	$\text{Pd}$	Iso	11.9	4½-5	Junto al platino.
Paragonita	$\text{NaAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Mon	2.85	2	Muscovita sódica
Pargasita	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_4\text{Al}_3\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Mon	3-3.5	5½	Horblenda Na verdosa.
Patronita	Sulfuro de V impuro				Mineral de vanadio (Perú).
Pearceita	$(\text{Ag,Cu})_{16}\text{As}_2\text{S}_{11}$	Mon	6.15	3	Variedad de polibasita.
Pectolita	$\text{NaCa}_2\text{Si}_3\text{O}_8(\text{OH})$	Tric	2.7-2.8	5	Cristales aciculares.
Penninita					Variedad de la clorita.
Pentlandita	$(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$	Iso	4.6-5.3	3½-4	Junto a pirrotita, 34-35% Ni.
Periclasea	$\text{MgO}$	Iso	3.6-3.9	5.5-6	Mineral de metamorfismo de contacto.
Peridoto					Gema de olivino.
Perovskita	$\text{CaTiO}_3$	Iso	4.03	5½	58% $\text{TiO}_2$

Pertita					Microclino y albita intercrecidas.
Petalita	$\text{Li(AlSi}_4\text{O}_{10})$	Mon	2.4	6-6½	Tipo de feldespatoide, 5% $\text{Li}_2\text{O}$
Petzita	$\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$	Iso?	8.7-9.0	2½-3	
Pigeonita	$(\text{Ca,Mg,Fe})\text{SiO}_3$	Mon	3.2-3.4	5-6	Piroxeno en rocas volcánicas básicas.
Pirargirita	$\text{Ag}_3\text{SbS}_3$	Rom	5.85	2½	Plata roja (rubí oscuro), raya roja 22.3 % Sb, 59.9% Ag.
Pirita	$\text{FeS}_2$	Iso	5.02	6-6½	Cristales estriados, 46.5% Fe.
Pirocloro	$(\text{Na,Ca})_2(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6(\text{OH,F})$	Iso	4.2-4.5	5	3-6% REO
Pirofilita	$\text{AlSi}_2\text{O}_5(\text{OH})$	Mon	2.8-2.9	1-2	Se asemeja al talco.
Pirolusita	$\text{MnO}_2$	Tet	4.75	1-2	De color negro como el hollín, 63.2% Mn.
Piromorfita	$\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$	Hex	6.5-7.1	3½-4	Brillo adamantino, 49-76 % Pb.
Piropo	$(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Iso	3.51	7	Granate color rojo oscuro.
Pirrotita (1)	$\text{Fe}_7\text{S}_8$	Mon	4.58	4	Magnético, 59.5% Fe.
Pirrotita (2)	$\text{Fe}_{11}\text{S}_{12}$	Hex	4.65	4	No es magnético, 62% Fe.
Pitchblenda					Uraninita.
Plagioclasa	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (albite) - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (anortita)	Tric	2.62-2.76	6	Ver Albite, Oligoclasa, Andesina, Labradorita, Bytownita, Anortita.
Plagionita	$\text{Pb}_5\text{Sb}_8\text{S}_{17}$	Mon	5.56	2½	Serie de la Jamesonita.
Plata	Ag	Iso	10.5	2½-3	De color blanco, maleable.
Platino	Pt	Iso	14-19	4-4½	También encontrado en forma de granos en placeres.
Pleonasta					Espinela de hierro.
Plumbago					Grafito
Polianita	$\text{MnO}_2$	Tet	5	6-6½	Pirolusita cristalina.
Polibasita	$(\text{Ag,Cu})_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$	Mon	6.0-6.2	2-3	74% Ag, 10% Sb, to 12% Cu.
Policrasea	$\text{AB}_2\text{O}_6$ , A = Y, Ce, Ca, U,Th; B = Ti, Nb, Ta, Fe	Ort	4.7-5.9	5½-6½	14-30% REO, max. 13% $\text{U}_3\text{O}_8$
Polihalita	$\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Tric	2.78	2½-3	Sabor amargo.
Polucita	$(\text{Cs,Na})_2\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot \text{H}_2\text{O}$	Iso	2.9	6½	Incoloro
Powelita	$\text{CaMoO}_4$	Tet	4.23	3½-4	Fluorescente, 48% Mo.
Prehnita	$\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{Si}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Ort	2.8-2.95	6-6½	Cristales tabulares.
Proclorita					Variedad de la clorita.
Proustita	$\text{Ag}_3\text{AsS}_3$	Rom	5.55	2-2½	Plata roja (rubí claro), raya roja 65.4% Ag, 15.2% As.
Psilomelano					Nombre de campo para los masivos minerales de manganeso.
<b>R</b>					
Rammelsbergita	$\text{NiAs}_2$	Ort?	7.1	5½-6	28% Ni
Rejalgar	AsS	Mon	3.48	1½-2	De color rojo, 70% As.
Riebeckita	$\text{Na}_2(\text{Fe,Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Mon	3.44	4	Anfíbol

Rodocrosita	$\text{MnCO}_3$	Rom	3.45-3.6	$3\frac{1}{2}$ - $4\frac{1}{2}$	De color rosado, 49% Mn.
Rodolita	$3(\text{Mg,Fe})\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Iso	3.84	7	Granate púrpura o rojo pálido.
Rodonita	$\text{MnSiO}_3$	Tric	3.58-3.70	$5\frac{1}{2}$ -6	De color rosado, 42% Mn.
Roscoelita	$\text{K}(\text{V,Al,Mg})_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Mon	2.97	$2\frac{1}{2}$	Mica de vanadio.
Rubelita					Roja o rosada turmalina.
Rubí					Gema roja de corindón.
Rutilo	$\text{TiO}_2$	Tet	4.18-4.25	6- $6\frac{1}{2}$	Brillo adamantino.
<b>S</b>					
Safiro					Corindón de gema azul.
Saleeita	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$				Mineral secundario de uranio de la serie de autunitas, fluorescente.
Samarskita	$(\text{RE,U,Ca,Fe,Pb,Th})(\text{Nb,Ta,Ti,Sn})_2\text{O}_6$	Ort	4.1-6.2	5-6	10-22% REO.
Sanidina					Ortoclase de alta temperatura.
Saponita	$(\text{Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$	Mon	2.5	$1$ - $1\frac{1}{2}$	Mineral de arcilla del grupo de las montmorillonitas.
Scheelita	$\text{CaWO}_4$	Tet	5.9-6.1	$4\frac{1}{2}$ -5	Fluorescente, 70-80% $\text{WO}_3$
Schorlita					Turmalina negra, común.
Selenita					Yeso cristalino.
Semseyita	$\text{Pb}_9\text{Sb}_8\text{S}_{21}$	Mon	5.8	$2\frac{1}{2}$	Serie de las Jamesonitas.
Sepiolita	$\text{Mg}_4(\text{Si}_2\text{O}_5)_3(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Mon?	2	$2$ - $2\frac{1}{2}$	Encontrado junto a Serpentina.
Sericita					Mica de alteración hidrotermal.
Serpentina	$(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Mon	2.2	2-5	43% MgO
Siderita	$\text{FeCO}_3$	Rom	3.83-3.88	$3\frac{1}{2}$ -4	48.2% Fe
Siegenita	$(\text{Co,Ni})_3\text{S}_4$	Iso	4.8	$4\frac{1}{2}$ - $5\frac{1}{2}$	
Silex	$\text{SiO}_2$		2.65	7	Cuarzo criptocristalino.
Silimanita	$\text{Al}_2\text{SiO}_5$	Ort	3.23	6-7	Cl (010) perfecto, 63.2% $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
Silvanita	$(\text{Au,Ag})\text{Te}_2$	Mon	8.0-8.2	$1\frac{1}{2}$ -2	25% Au, 15% Ag.
Silvita	KCl	Iso	1.99	2	Cl cúbico perfecto, 63% $\text{K}_2\text{O}$ .
Skłodowskita	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Ort	3.54	?	64% $\text{U}_3\text{O}_8$
Smithsonita	$\text{ZnCO}_3$	Rom	4.35-4.40	5	52% Zn
Sodalita	$\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$	Iso	2.15-2.3	$5\frac{1}{2}$ -6	Tipo de feldespatoide.
<b>T</b>					
Talco	$\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	Mon	2.7-2.8	1	Graso al tacto.
Tantalita	$(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$	Ort	6.2-8.0	6- $6\frac{1}{2}$	52-86% $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , max. 31% $\text{Nb}_2\text{O}_5$
Tapiolita	$(\text{Fe,Mn})(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_6$	Tet	7.3-7.8	6	Dimorfo con Tantalita.
Tefroita	$\text{Mn}_2(\text{SiO}_4)$	Ort	4.1	6	Raro olivino.
Tennantita	$(\text{Cu,Fe,Zn,Ag})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	Iso	4.6-5.1	$3$ - $4\frac{1}{2}$	Max. 11% Fe, 9% Zn, 14% Ag, 4% Pb, 1% Co, 30-53% Cu.
Tenorita	$\text{CuO}$	Tric	5.8-6.4	3-4	De color negro, 79.9% Cu.

Tetrahedrita	$(\text{Cu,Fe,Zn,Ag})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	Iso	4.6-5.1	3-4½	Max. 45% Cu, 13% Fe, 8% Zn, 18% Ag, 17% Hg, 16% Pb, 4% Ni.
Thenardita	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	Ort	2.68	2½	En lagos salinos.
Thomsonita	$\text{NaCa}_2\text{Al}_5\text{Si}_5\text{O}_{20}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Ort	2.3	5	Tipo de zeolita.
Thorianita	$\text{ThO}_2$	Iso	9.7	6½	17% $\text{U}_3\text{O}_8$
Titanita					Esfena
Topacio	$\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F,OH})_2$	Ort	3.4-3.6	8	Cl (001) perfecto.
Torbernita	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tet	3.22	2-2½	De color verde, 6-7% Cu.
Torita	$\text{Th}(\text{SiO}_4)$	Tet	5.3	5	Usualmente hidratado.
Tremolita	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	Mon	3.0-3.3	5-6	Anfíbol de Ca, cortas fibras de asbesto.
Tridimita	$\text{SiO}_2$	Ort	2.26	7	Encontrado en rocas volcánicas (870-1470°C)
Trifilita	$\text{Li}(\text{Fe,Mn})\text{PO}_4$	Ort	3.42-3.56	4½-5	9.5% $\text{Li}_2\text{O}$ , 45% $\text{P}_2\text{O}_5$
Troilita					Pirrotita.
Trona	$\text{Na}_2\text{CO}_3\cdot \text{NaHCO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.13	3	Sabor alcalino.
Tulita					Zoicita roja-rosada.
Tungstita	$\text{WO}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$	Ort?	?	2½	Mineral secundario.
Turgita	$2\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$	?	4.2-4.6	6½	Junto a goethita.
Turmalina	$\text{XY}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{OH})_4$ X = Na, Ca; Y = Al, Fe, Li, Mg	Rom	3.0-3.25	7-7½	Sección trigonal.
Turquesa	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Tric	2.6-2.8	6	De color azul-verde, 5.5-7.8% Cu.
Tyuyamunita	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{VO}_4)_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Ort	3.7-4.3	2	Similar a la carnotita, 56% $\text{U}_3\text{O}_8$ , 20% $\text{V}_2\text{O}_5$
<b>U</b>					
Ulexita	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tric	1.69	1	7.7% $\text{Na}_2\text{O}$ , 43% $\text{B}_2\text{O}_3$
Uralita					Hornblenda después piroxeno.
Uraninita	$\text{UO}_2\text{ a } \text{UO}_3$	Iso	9.0-9.7	5½	De color amarillo verdoso.
Uranofana	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2\text{Si}_2\text{O}_7\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Ort	3.81-3.90	2-3	63% $\text{U}_3\text{O}_8$
Uranosfaerita	$\text{Bi}_2\text{O}_3\cdot 2\text{UO}_3\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Ort	6.36	2-3	61% $\text{U}_3\text{O}_8$ .
Uvarovita	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$	Iso	3.45	7½	Granate verde.
<b>V</b>					
Vanadinita	$\text{Pb}_5(\text{VO}_4)_3\text{Cl}$	Hex	6.7-7.1	3	19.4% $\text{V}_2\text{O}_5$ , 68-73% Pb
Variscita	$\text{Al}(\text{PO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Ort	2.4-2.6	3½-4½	De color verde, masivo.
Vermiculita		Mon	2.4	1½	Biotita alterada.
Vesuvianita					Idocrasa.
Violarita	$\text{Ni}_2\text{FeS}_4$	Iso	4.8	4½-5½	34-43% Ni, 15-18% Fe.
Vivianita	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.58-2.68	1½-2	Cl (010) perfecto, 28% $\text{P}_2\text{O}_5$
<b>W</b>					
Wad	Hidróxidos de Mn				Nombre de campo, 25-48% Mn
Wavelita	$\text{Al}_3(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Ort	2.33	3½-4	35% $\text{P}_2\text{O}_5$ , 38% $\text{Al}_2\text{O}_3$ .
Wernerita					Escapolita.

Willemita	$\text{Zn}_2\text{SiO}_4$	Rom	3.9-4.2	5½	Fluorescente, 58.5% Zn.
Witherita	$\text{BaCO}_3$	Ort	4.3	3½	Efervesce en HCl, 77.7% BaO.
Wolframita	$(\text{Fe},\text{Mn})\text{WO}_4$	Mon	7.0-7.5	5-5½	Alrededor del 75% $\text{WO}_3$
Wollastonita	$\text{Ca}(\text{SiO}_3)$	Tric	2.8-2.9	5-5½	Cl (001), (100).
Wulfenita	$\text{PbMoO}_4$	Tet	6.5-7.5	3	De color naranja-rojo, 56% Pb, 26.6% Mo.
Wurtzita	$(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$	Hex	4	4	Max. 67% Zn, 8% Fe, 3.6% Cd.
<b>X - Y</b>					
Xenotima	$\text{YPO}_4$	Tet	4.4-5.1	4-5	61.4% REO, 38.6% $\text{P}_2\text{O}_5$
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Mon	2.32	2	Cl (010), (100), (011). 32.5% CaO
Yodargirita	AgI	Hex	5.7	1-1½	Séctil, 45% Ag.
<b>Z</b>					
Zeolitas					Ver Analcima, Chabazita, Heulandita, Natrolita y Estilbita.
Zincita	$\text{ZnO}$	Hex	5.68	4-4½	80% Zn, raya color anaranjado-amarillo.
Zinkenita	$\text{Pb}_6\text{Sb}_{14}\text{S}_{27}$	Hex	5.3	3-3½	Serie de la Jamesonita.
Zinnwaldita	Fe, Li mica	Mon	3	2.5-3	Alrededor del 5% $\text{Li}_2\text{O}$ .
Zircón	$\text{ZrSiO}_4$	Tet	4.68	7½	67.2% $\text{ZrO}_2$
Zoisita	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	Ort	3.3	6	Variedad de la clinozoicita.

**Tabla 2.** Minerales comúnmente encontrados por los geólogos, y los de mayor importancia económica.  
**Nomenclatura:** Mon=Monoclínico, Tric=Triclínico, Ort=Ortorrómico, Tet=Tetragonal, Hex=Hexagonal, Rom=Rómbico, Iso=Isométrico o cúbico, Amf=Amorfo. (Tomado de Hulburt, 1961 y Palache, 1944).

### 3.2. CLASIFICACIÓN DE ROCAS ÍGNEAS

Muchos nombres tradicionales de rocas ígneas indican al geólogo, el área geográfica en la que se identificaron por primera vez (como ejemplo gabro, tonalita, andesita, etc.). Estos nombres proporcionan una información útil, tal como indicador químico, mineralógico o naturaleza textural de la roca.

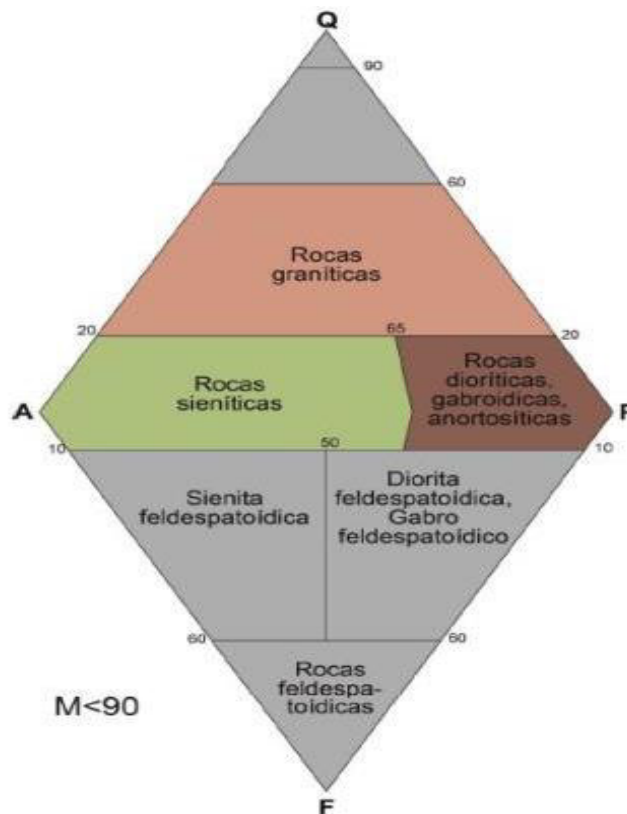
Uno de los principales objetivos de este trabajo es reducir el número de nombres necesarios para cubrir todas las principales variantes de la clasificación de rocas ígneas, y simultáneamente crear nombres que son más informativos para los geólogos.

Uno de los problemas de clasificación de las rocas ígneas es que no todas pueden ser clasificadas sensiblemente mediante el uso de un solo diagrama (Berkman, 2001). Por ejemplo, los parámetros modales necesarios para definir adecuadamente una roca félsica, compuesta por cuarzo y feldespatos, son muy diferentes de los requeridos para

definir una roca ultramáfica, que consta de olivino y piroxenos; clasificaciones modales no pueden ser aplicadas a las rocas que contienen vidrio o minerales no identificables de manera macroscópica o microscópica, teniéndose que usar otros criterios, como la composición química.

### 3.2.1. Clasificación de rocas plutónicas - sistema I.U.G.S.

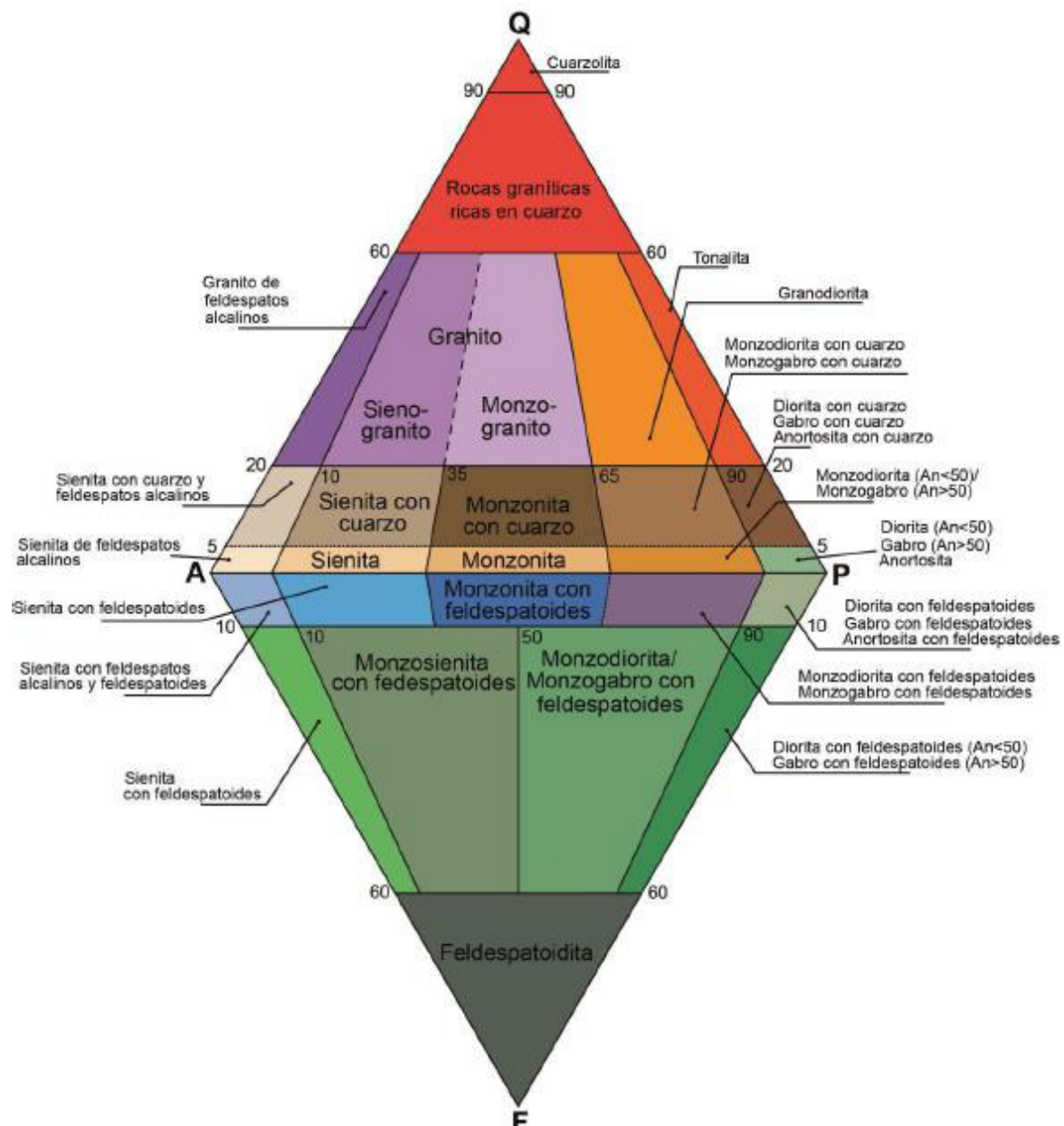
La clasificación de rocas ígneas plutónicas está basada en los parámetros modales, ya que puede ser útil disponer de un sistema simple para usarse en el campo, de allí proviene el uso del término granitoides o rocas graníticas (*Streckeisen, 1976*), que agrupa a granitos con feldespatos alcalinos, granitos, granodioritas y tonalitas. Por otra parte el mismo autor empleó el término gabroides, para las rocas del grupo del gabro (noritas, dioritas, anortositas, etc.), además de considerar las rocas ultramáficas. En el campo podemos emplear esta clasificación provisional del diagrama QAPF simplificado (*Fig. 1.2.1*), mediante la determinación rápida de proporciones de cuarzo, feldespatos potásicos, plagioclasas, feldespatoideos y máficos en muestra de mano. (*Tomado de Woolley et. al., 1996*)



**Figura 10.** Diagrama QAPF simplificado para clasificación en campo de rocas plutónicas (después de *Streckeisen, 1976*).

➤ **Clasificación QAFP ( $M < 90\%$ )**

Cada roca ígnea posee características distintivas, por las que los geólogos experimentados conocen y son capaces de clasificarlas adecuadamente; sin embargo, la base de la identificación está representada en el diagrama QAFP, el cual consiste en determinar el contenido modal de los minerales cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico y feldespatoideos (Fig. 11). (Sanchez, 2015).

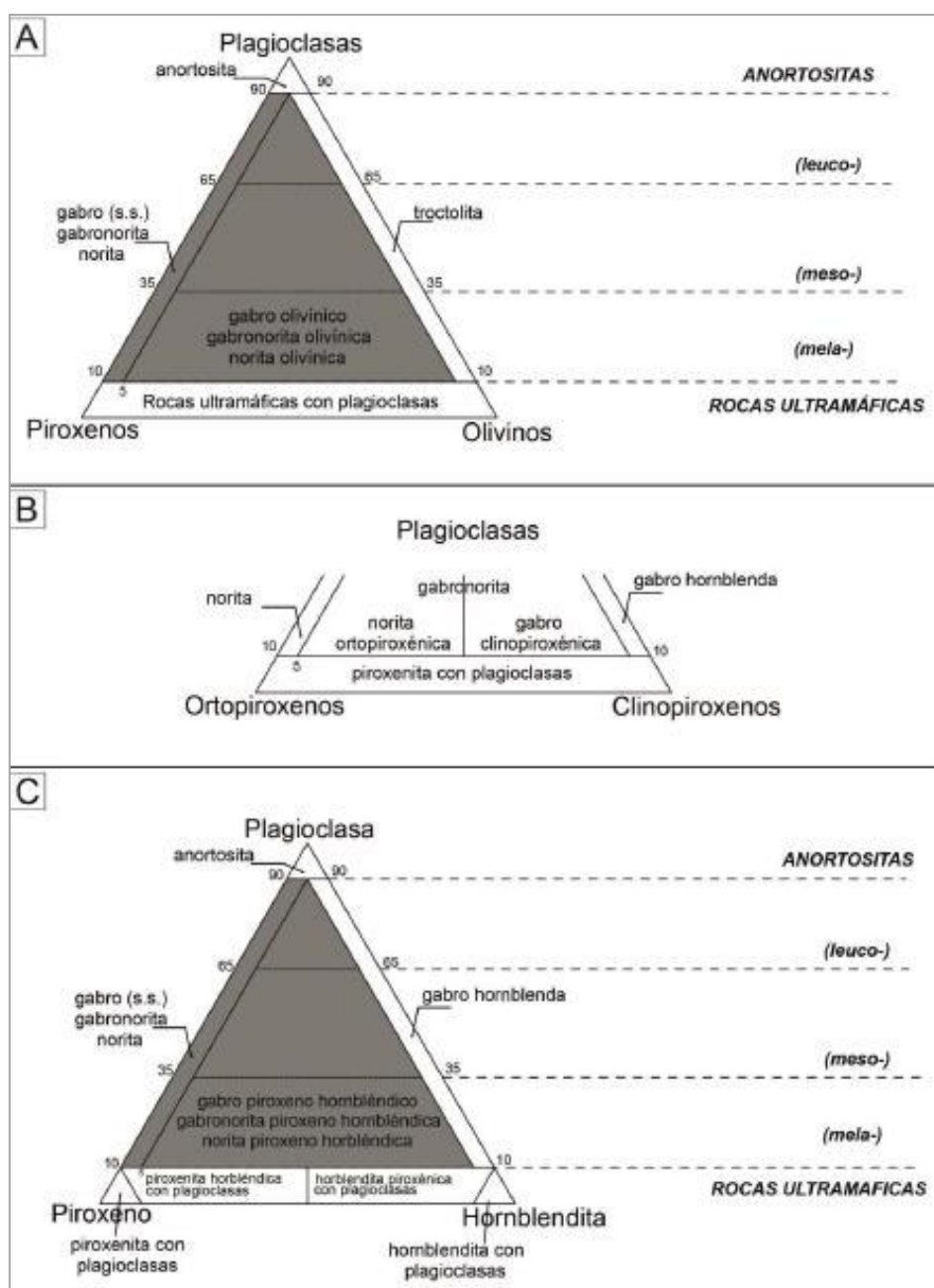


**Figura 11.** Clasificación y nomenclatura de rocas plutónicas de acuerdo al contenido modal de los minerales usando el diagrama de QAFP (basados en Streckeisen, 1976). Las esquinas del triángulo doble son Q = cuarzo, A= Feldespato potásico, P= plagioclasas y F= Feldespatoide. El diagrama no debe ser usado para rocas en las cuales el contenido de minerales máficos, M, es mayor a 90%.



➤ **Rocas plutónicas del grupo del Gabro o Gabroides**

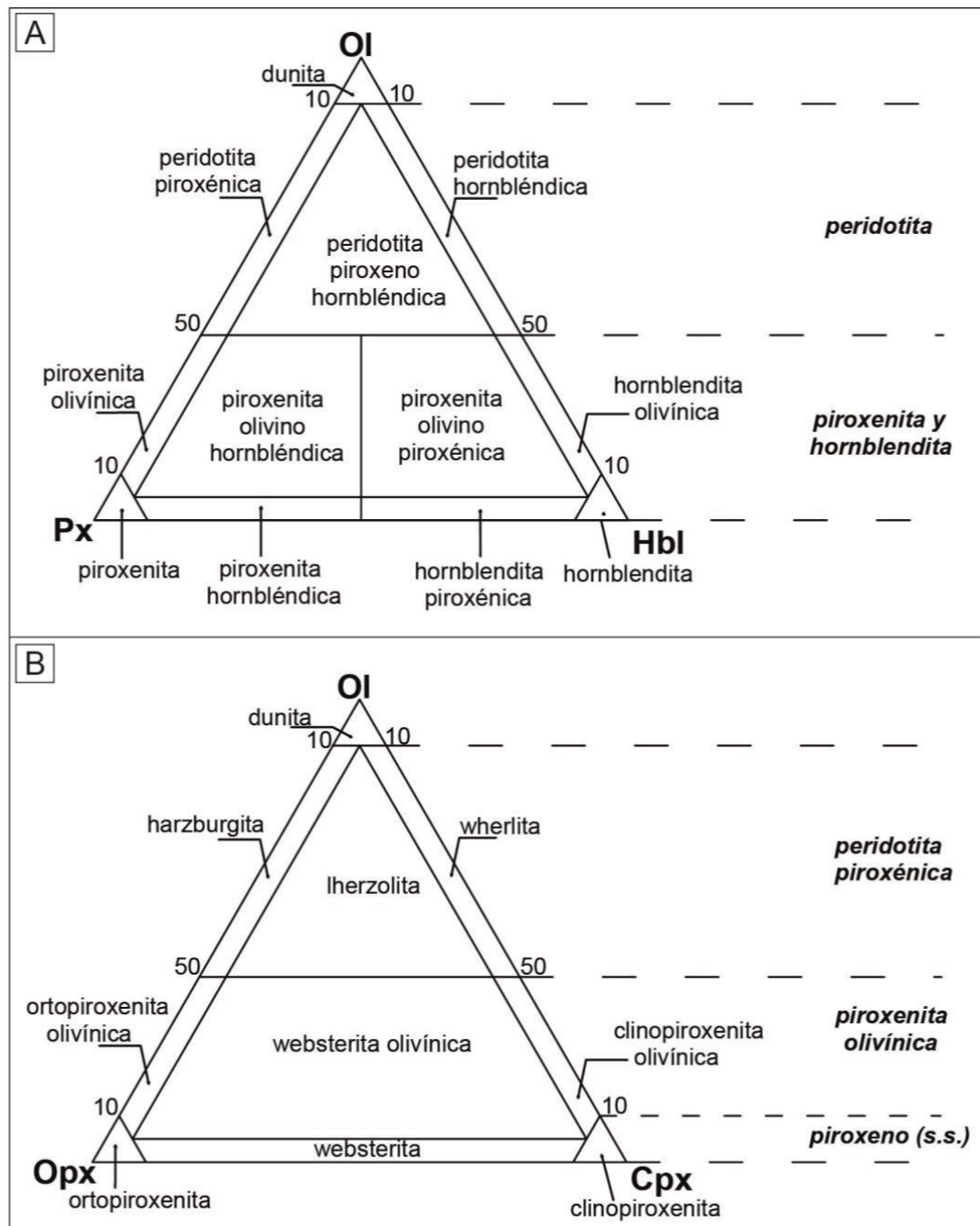
Estas rocas corresponden al campo de la diorita, gabro y anortosita del diagrama QAPF (Fig. 11), son clasificadas de acuerdo al contenido de plagioclasas y minerales máficos, cómo olivino, ortopiroxenos, clinopiroxenos y hornblenda. Para su clasificación se emplean los diagramas de la Figura 12, representados por dos triángulos, uno basado en el contenido de plagioclasa, piroxenos y olivino; mientras que el otro considera la composición en plagioclasas, piroxenos y anfíboles. (Sanchez, 2015).



**Figura 12.** Diagrama triangulares para la clasificación y nomenclatura de rocas gabroicas basadas en las proporciones de plagioclasas, piroxenos, olivino, clinopiroxenos y hornblenda. (Después de Streckeisen, 1976).

➤ **Rocas ultramáficas ( $M > 90\%$ )**

Las rocas ultramáficas se clasifican de acuerdo a su contenido de minerales máficos; consistiendo esencialmente de olivino, ortopiroxeno, clinopiroxeno, hornblenda, a veces con biotita, y pequeñas cantidades de granate y espinela. (Sanchez, 2015).



**Figura 13.** Diagrama triangulares para la clasificación y nomenclatura de rocas ultramáficas basadas en las proporciones de olivino (Ol), ortopiroxenos (Opx), clinopiroxenos (Cpx), piroxenos (Px) y hornblenda (Hbl). (Después de Streckeisen, 1973).





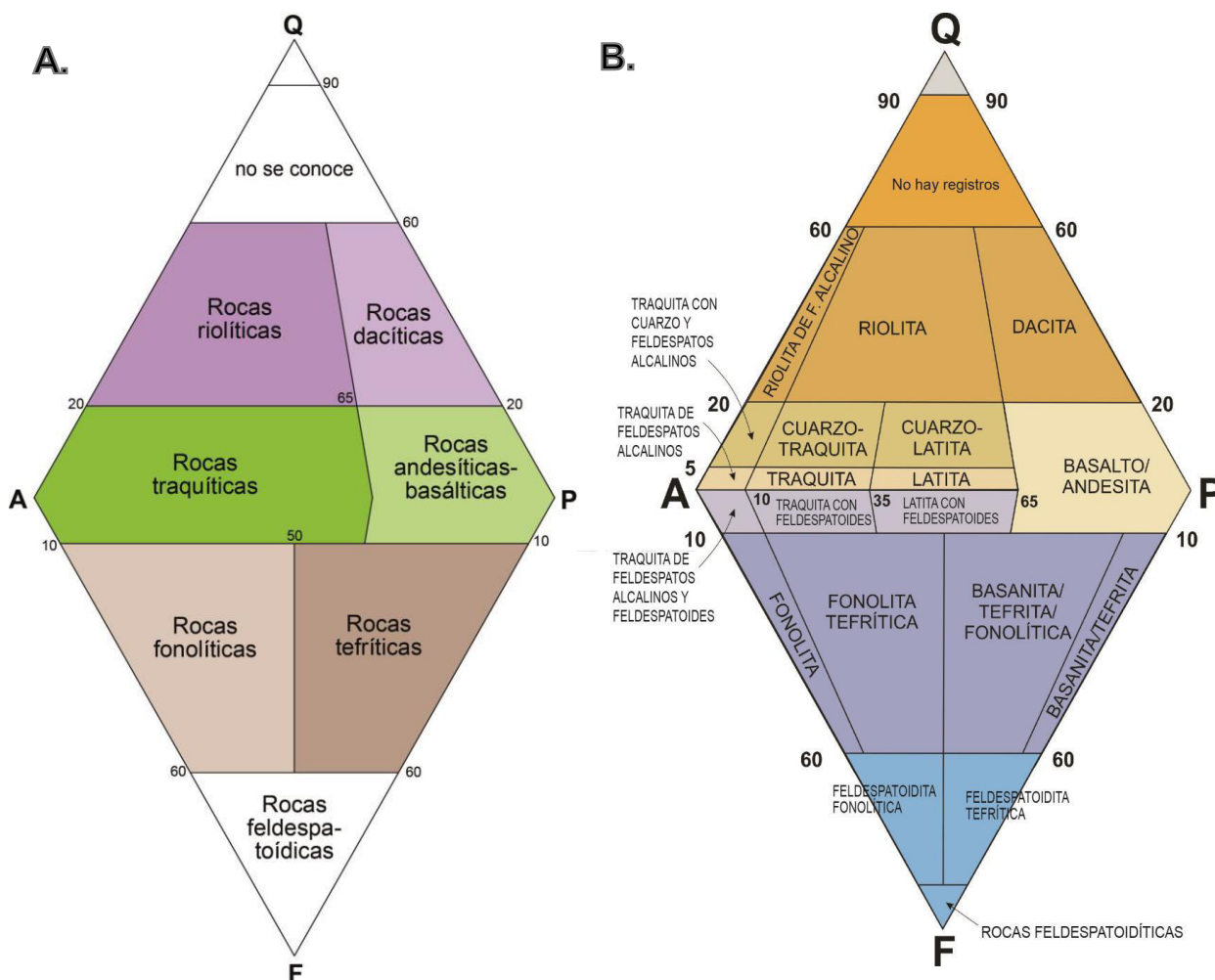
**Figura 14.** A) Monzonita con cuarzo, presenta trazas de calcopirita diseminada, obsérvese la textura granular o fanerítica; B) Monzonita, apréciase los cristales alargados y pequeños de hornblenda junto a cristales de feldespato potásico de color rosado y blanco (Mina Las Bambas); C y D) Afloramiento de intrusivo granodiorítico de textura fanerítica (carretera Chalhuanca-Abancay), E y F) Afloramiento de diorita mineralizada, obsérvese la predominancia de cristales máficos (hornblenda) junto a plagioclasas (Prospecto Sarconta).



### 3.2.2. Clasificación de rocas volcánicas - sistema I.U.G.S.

El primer paso para avanzar correctamente en la descripción y clasificación de una roca de este tipo es decidir si es volcánica o volcanoclástica; básicamente consiste en identificar la textura original y estructuras diagnósticas de procesos de emplazamiento (diferenciar facies lávicas de depósitos piroclásticos). Posterior a ello se debe utilizar de manera eventual el diagrama QAPF simplificado (Fig. 15).

Otro criterio de clasificación en campo es identificar la presencia de algunos minerales félsicos y máficos, como por ejemplo los característicos “ojos de cuarzo” presentes en las rocas dacíticas. Este procedimiento se puede aplicar para lavas, domos y rocas piroclásticas.



**Figura 15.** A) Diagrama QAPF para clasificación en campo de rocas volcánicas; B) Clasificación y nomenclatura de rocas volcánicas de acuerdo al contenido modal (cuantitativo) de los minerales usando el diagrama QAPF (basado en Streckeisen, 1978).

### 3.2.3. Clasificación de rocas volcanoclásticas y piroclásticas - sistema I.U.G.S.

Para clasificar una roca como “volcanoclástica” (Fisher, 1961), se sugiere que la roca o depósito no consolidado debe tener más del 10% del volumen de fragmentos volcánicos (Echavarría, 2002).

La IUGS (International Unión of Geological Sciences) define a las rocas piroclásticas, como aquellas formadas por el resultado directo de la acción o actividad volcánica; sin embargo, el grupo también incluye rocas y depósitos compuestos de fragmentos formados por procesos sedimentarios. (Sanchez, 2015).

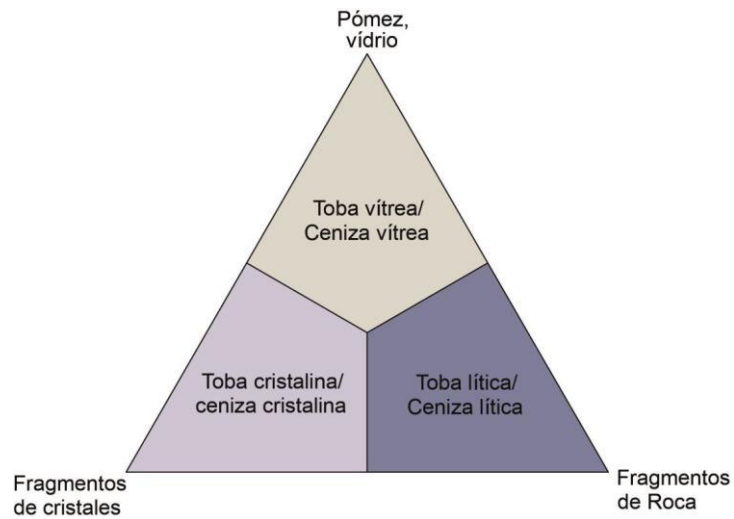
Estas son características alternativas que se deberían evaluar en el campo: descripción de la muestra de mano, afloramiento (estratificado, macizo, estructuras), contactos y geometría.

Tamaño del fragmento en mm	Fragmento piroclástico dominante	Sedimento piroclástico	Roca Piroclástica
64	Bombas Bloques	Aglomerado de bloques Tefra de bomba o de bloques	Aglomerado Brecha piroclástica
	Lapilli	Capa de lapilli o Tefra de lapilli	Toba de lapilli
2	Grano de ceniza gruesa	Ceniza gruesa	Toba de ceniza gruesa
1/16	Grano de ceniza fina	Ceniza fina	Toba de ceniza fina

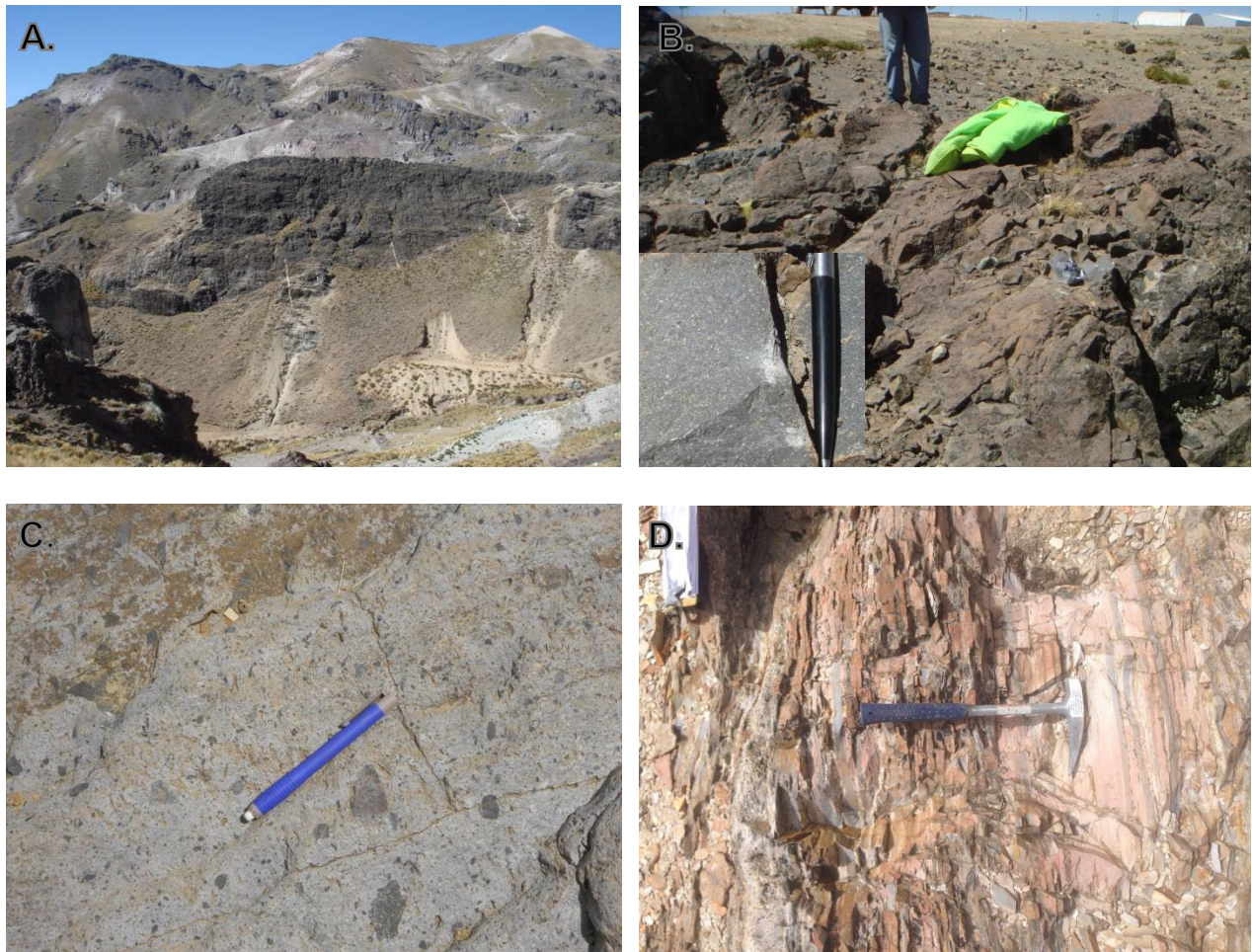
**Tabla 3.** Clasificación y nomenclatura de fragmentos piroclásticos y rocas piroclásticas, basado en el tamaño de clastos (después de Schmid, 1981).

Tamaño promedio del fragmento en mm	Rocas Piroclásticas	Mezcla de Piroclásticos-Epiclásticos	Rocas volcanoclásticas
64	Aglomerado Brecha piroclástica	Conglomerado tobáceo Brecha tobácea	Conglomerado volcanoclástico
	Toba de Lapilli		
2	Toba de ceniza gruesa	Arenisca tobácea	Arenisca volcanoclástica
1/16	Toba de ceniza fina	Limolita tobácea Arcillita tobácea	Limolita volcanoclástica Arcillita volcanoclástica
Cantidad de material piroclástico	100% - 75%	75% - 25%	25% - 0%

**Tabla 4.** Clasificación de rocas volcanoclásticas con contenido mayor al 10% de fragmentos volcánicos (basado en Schmid, 1981). Términos usados para la mezcla de rocas epiclásticas y piroclásticas.



**Figura 16.** Clasificación de rocas piroclásticas polimodales en las proporciones de bloques/bombas, lapilli y cenizas según Fisher (1961).



**Figura 17.** A) Secuencia volcánica compuesta por tobas cristalinas y tobas líticas (Mina Pallancata), B) Andesita de color gris, se observan pequeños cristales de plagioclasa envueltos en una matriz criptocristalina (Mina Inmaculada), C) Toba lítica, obsérvense los fragmentos líticos soportados en una matriz de ceniza soldada, D) Textura fluidal de un domo de composición riolítica (Prospecto Zamira).

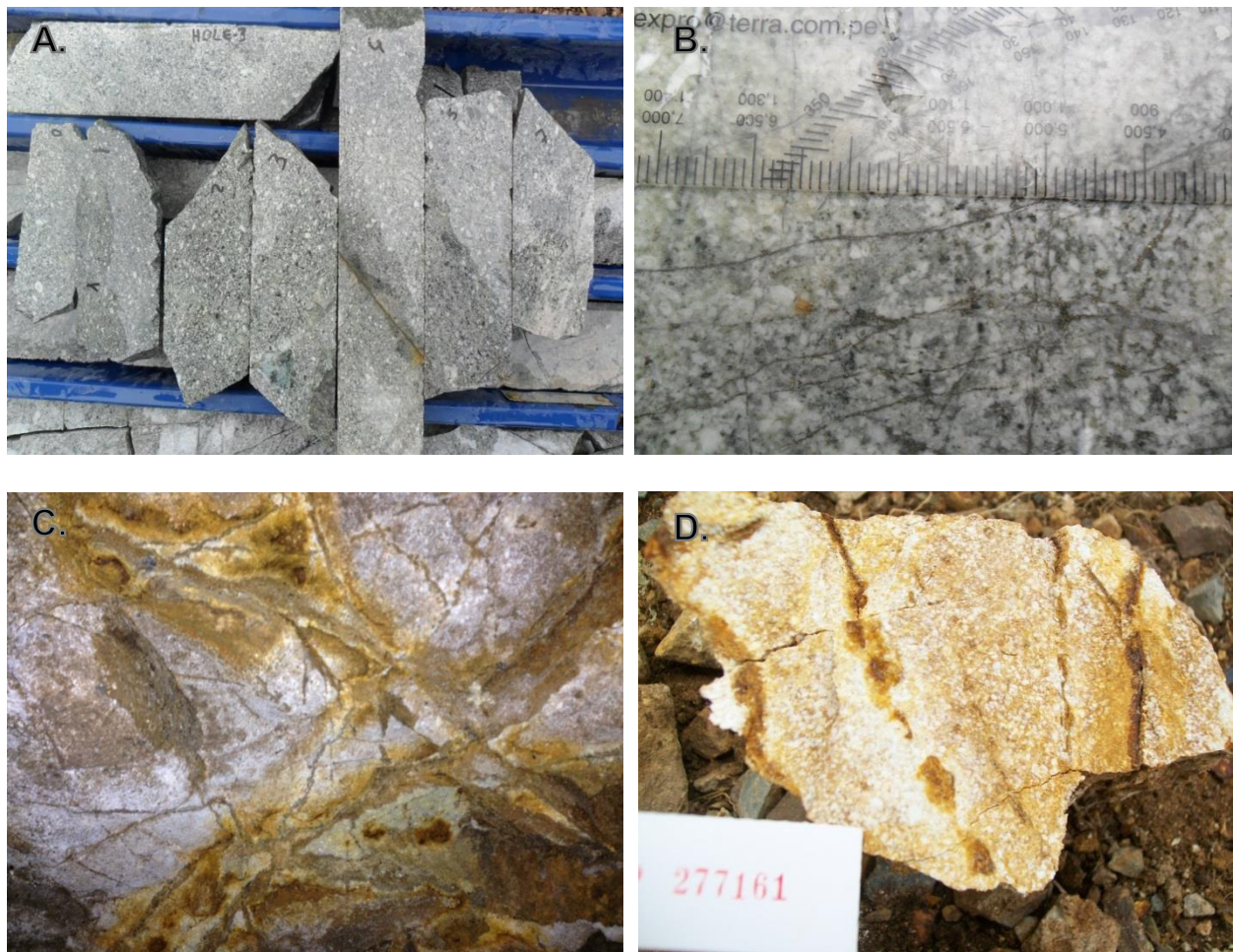


### 3.2.4. Rocas ígneas hipoabisales

Este tipo de rocas también son conocidas como filonianas, siendo intrusivos menores que han cristalizado en un nivel intermedio a alto. Para definir la nomenclatura para este tipo de rocas debe agregarse el calificativo “pórfido” (IUGS, 1989) al equivalente composicional plutónico o volcánico.

Los argumentos más útiles parecen ser el tamaño del grano y las texturas mayormente porfídicas; sin embargo, hay casos en que la distinción en base a estos dos parámetros es difícil, por lo que habría que observar detalladamente las relaciones de campo y estructuras internas de los cuerpos de roca. Por ejemplo, para dar la nomenclatura a una roca de composición andesítica, relacionada con el intrusivo según el tamaño de grano y textura, su equivalente hipoabisal es un **Pórfido diorítico**.

En el caso de que se relacione con un volcánico (nivel sub-volcánico) su equivalente será **Pórfido andesítico**. (Perelló et. al, 2003).



**Figura 18.** A y B) Pórfidos dioríticos, obsérvese la textura porfírica con cristales subhedrales de plagioclasa, y cortado por venillas de sílice (Proyecto Viruna), C y D) Pórfido diorítico cortado por vetillas cuarzo-pirita (Prospecto Mumalca).

### 3.3. ROCAS METAMÓRFICAS

Hay muchos modos de clasificar convenientemente las rocas metamórficas, pudiéndose agrupar en amplios tipos litológicos; otros criterios están basados en la estructura, textura y la mineralogía, las clases químicas, grado de metamorfismo o en el concepto de facies metamórficas (*Fig. 19*). (*Sanchez, 2015*).

El objetivo de esta clasificación es identificar de manera sencilla el tipo de roca metamórfica por medio de la estructura y textura. Se distinguen dos clases principales que son las rocas metamórficas foliadas y no foliadas o granoblásticas.

#### ➤ **Rocas metamórficas foliadas**

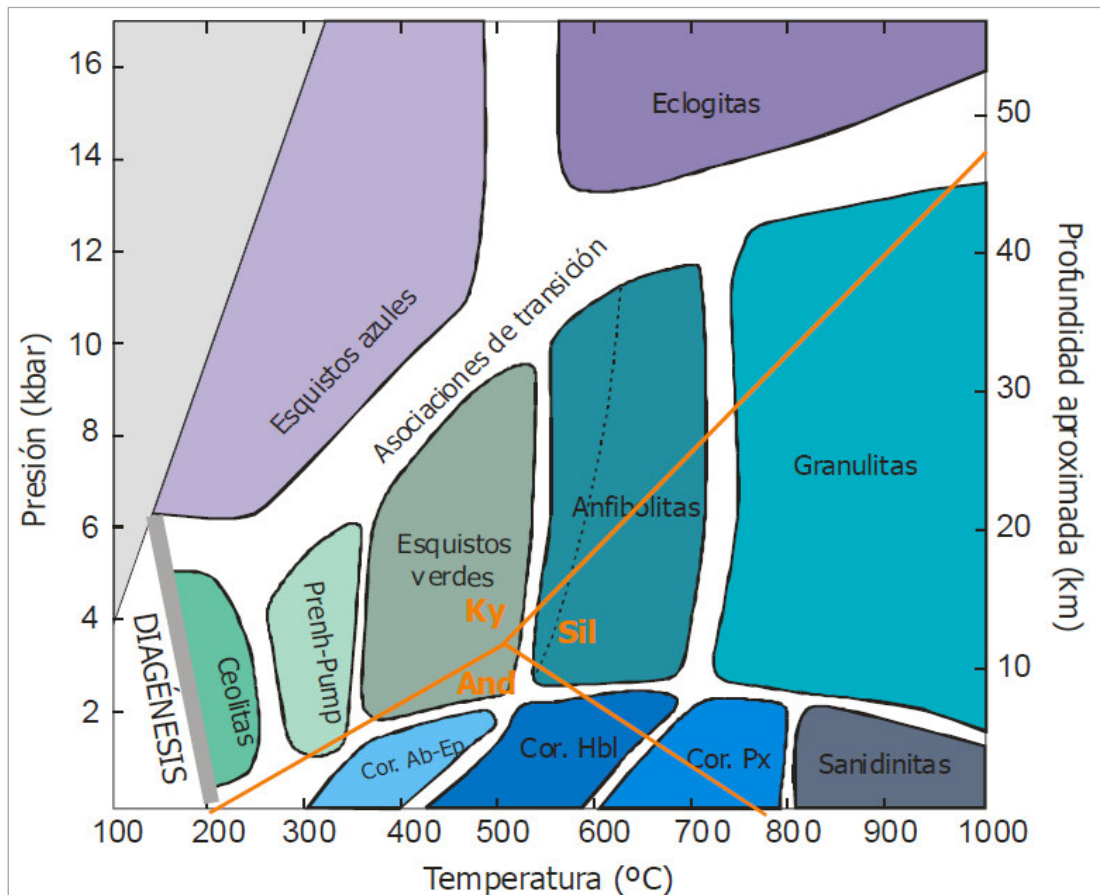
Estas rocas se caracterizan por presentar estructuras tipo clivaje pizarroso, esquistosidad, bandeamiento gnéisico, además presentan alineación paralela de minerales, lo cual le otorga a la roca una apariencia de capas o bandas, lo que hace fácilmente reconocerlas en el campo. Las rocas más comunes se conocen como: pizarra, filita, esquisto, gneis.

#### ➤ **Rocas metamórficas no-foliadas**

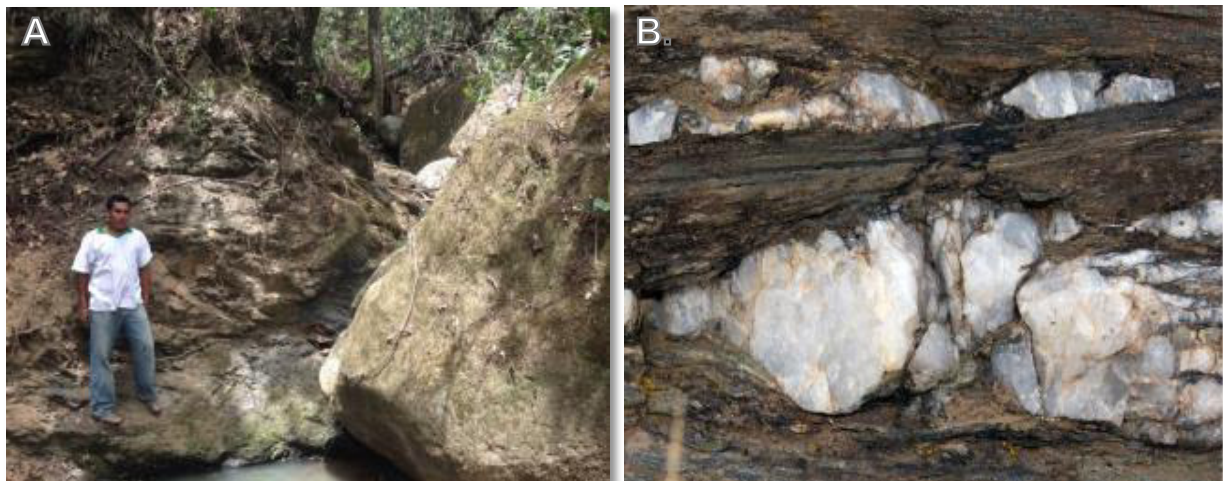
Estas rocas poseen una estructura interna de masa isótropa, es decir el arreglo de los granos minerales y componentes petrográficos no muestran una orientación preferencial distinguible, en lugar de esto, presentan una estructura maciza. Estas rocas se conocen en conjunto como: hornfels o corneanas y granofélsicas, entre éstas, las más comunes son el mármol y la cuarcita. Existe una gran variedad de rocas metamórficas complejas y difíciles de clasificar en el campo, por lo que si se desea realizar un estudio más a fondo de ello se recomendaría utilizar el criterio de facies metamórficas; el cual, nos dice: una facie metamórfica es un conjunto de asociaciones minerales repetidamente asociadas en el espacio y en el tiempo, de modo que existe una relación constante y, por tanto, predecible entre la mineralogía y la composición química global de la roca (Turner, 1981).

La facies metamórfica es una herramienta de doble uso. Por un lado es descriptiva, ya que relaciona la composición de una roca con su mineralogía, el segundo uso es interpretativo, ya que sirve para conocer el rango de las condiciones de presión y temperatura que caracterizan a cada facie. (*Sanchez, 2015*).





**Figura 19.** Distribución de facies metamórficas sobre un diagrama Presión-Temperatura (P-T). Las zonas blancas corresponden a asociaciones de transición. (Después de Yardley, 1989 y Robertson, 1999).



**Figura 20.** A) Secuencia de esquistos grisáceos pertenecientes a la formación Salas, B) Vista al detalle de los esquistos, mostrando los planos de esquistosidad rellenos con cuarzo de segregación e hidrotermal (Prospecto El Palto).

Por otra parte, los efectos más evidentes del metamorfismo de contacto se marcan en las rocas pelíticas y calcáreas, ya que su temperatura de formación es fría, y el contacto con una roca caliente las alteraría fácilmente. A profundidad, el intrusivo puede tener casi la misma temperatura que la roca encajonante y la aureola de metamorfismo puede ser insignificante; sin embargo, los grandes plutones que casi afloran, son los productores de los mayores zoneamientos de metamorfismo.

MINERAL INICIAL	PRODUCTO RETROGRESIVO	OBSERVACIONES
<b>Rocas Ultramáficas</b>		
Olivino	Serpentina/talco/magnetita-Hm	Si los fluidos son ricos en H <sub>2</sub> O
	Magnetita, Ankerita	Si los fluidos son ricos en CO <sub>2</sub>
Enstatita (Cpx - Mg)	Antofilita	
Opx y/o Olivino	Talco +/- Serpentina	
<b>Metabasitas</b>		
Plagioclasa Calcica	(Plagioclasa - Na) + epidota	Retrogresión muy común de la facie: antofilita a facies de esquistos verdes (fluidos ricos en H <sub>2</sub> O)
	Zeolitas	Común en el metamorfismo de enterramiento y en el de fondo oceánico
	Sericita/muscovita	En las metabasitas esta retrogresión requiere el aporte de K <sup>+</sup> .
	Calcita	Si los fluidos son ricos en CO <sub>2</sub>
	Escapolita	En el metamorfismo hidrotermal con fluidos ricos en CO <sub>2</sub>
Cpx (Augita)	Hornblenda/uralita/actinolita/biotita/clorita/cuarzo	
Opx (Hiperstena)	Hornblenda/actinolita	
Hornblenda	Actinolita/hidrobiotita/clorita/sericita/ARCes/epidota/cuarzo.	Puede producir minerales de serpentina y talco, bajo ciertas condiciones. También es reemplazado por sulfuros
	CBTs, pirita y/o magnetita	Debido a sus componentes de: Ca, Fe y Mg
	Rutilo - leucoxeno	Debido a sus componentes de: Titanio (Ti)
	Biotita	Normalmente asociado al aporte de K <sup>+</sup>
Antifol Sódico (glaucofana)	Actinolita	
Granate	Clorita	
Ilmenita ó rutilo	Esfena	
	Pirita	Si los fluidos son ricos en Fe
	Leucoxeno	Si los fluidos son ricos en Ti
Magnetita	Leucoxeno - rutilo/pirita	Si existe Titanio/Si existe Hierro
<b>Rocas Cuarzo-feldespáticas</b>		
Cuarzo	Sericita/Feldespatos (FPs),	Generalmente resistente a alteración, pero puede ser reemplazado por los minerales mencionados.
	Carbonatos (CBTs), otros	
Feldespato Potásico	Sericita/hidromuscovita/pirrolita	Frecuentemente resistente a alteración. En fase Intensa de alteración se produce los minerales mencionados
	Minerales de arcilla, alunita,	
	epidota, zolsita, cuarzo y albita	
Plagioclasa	Sericita +/- epidota	
Biotita	Hidrobiotita/Clorita/sericita/hidromuscovita/ARCes/epidota/cuarzo	Componentes de Fe y Mg, puede producir CBTs (Ankerita)
	magnetita/rutilo/leucoxeno	Frecuentemente es reemplazado por varios sulfuros
		Formados por componentes de Fe y Ti.
<b>Rocas Calcosilicatadas</b>		
Forsterita	Serpentina	
Anortita	Epidota +/- sericita, Carbonatos	
Diopsido	Tremolita - actinolita	
Tremolita	Talco	
<b>Metapelitas</b>		
Granate	Clorita y/o biotita	
Estaurolita	Sericita, Sericita + clorita	
Andalucita, sillimanita, distena	Sericita/mica blanca	
Cordierita	Pinnita (mezcla microcristalina de sericita y clorita)	
Cloritoide	Clorita +/- sericita	
Biotita	Clorita	
Carbonatos	Cuarzo, Silicatos de Ca,Mg,Mn, Talco y serpentina	

**Tabla 5.** Minerales de retrogresión comunes en diferentes categorías de rocas metamórficas. (Schimid et al. 2007).

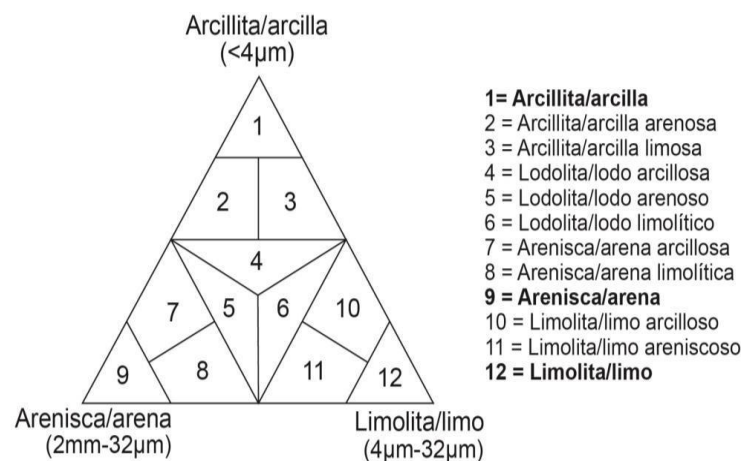
### 3.4. ROCAS SEDIMENTARIAS

Esta clasificación explora la diversidad total de las rocas sedimentarias. Un compendio sencillo y útil para reconocer e identificar las rocas sedimentarias básicas sin incidir en los fundamentos o detalles técnicos. Se clasifican en once grandes grupos de acuerdo a la clasificación del Servicio Geológico Británico, BGS (Hallsworth & Knox, 1999):

- Sedimentos siliciclásticos y rocas siliciclásticas
- Sedimentos y rocas con detritos volcanoclásticos
- Sedimentos carbonatados y rocas carbonatadas
- Sedimentos y rocas fosfatadas y fosforitas
- Sedimentos y rocas con hidróxidos de hierro y sideritas
- Sedimentos y rocas ricas en contenido orgánico
- Sales no-carbonatadas (rocas evaporíticas)
- Sedimentos y rocas no-clásticas ricos en sílice
- Sedimentos y rocas alúmino-ferruginosas
- Sedimentos y rocas híbridas
- Sedimentos y rocas basadas en el tamaño de grano o cristal.

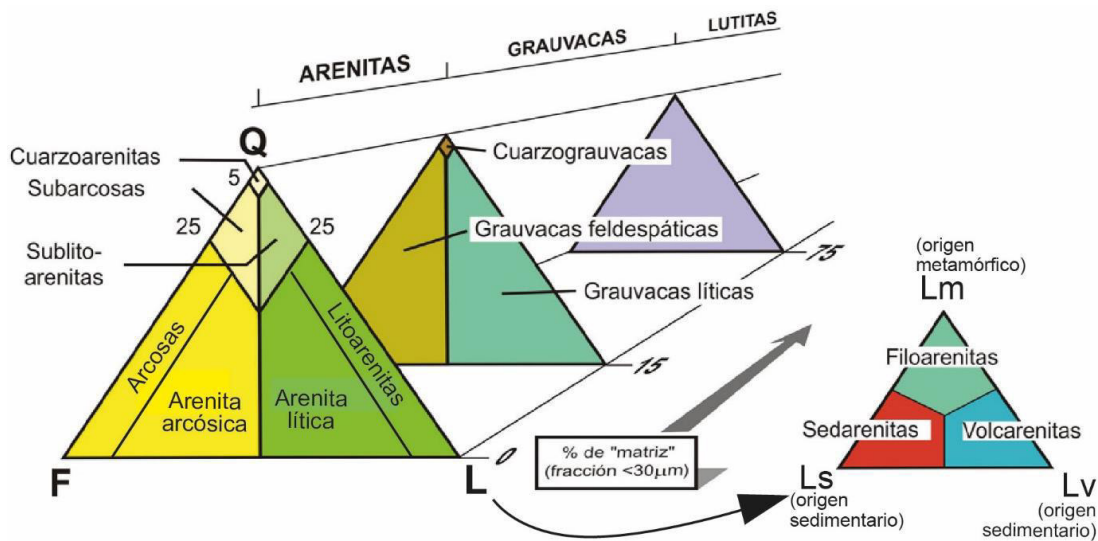
#### ➤ **Rocas detríticas**

Son aquellas rocas conocidas como silicoclásticas (areniscas, limolitas y lutitas), ya que sus fragmentos clásticos son derivados de rocas silíceas pre-existentes; subdividiéndose en base al tamaño de granos y la escala de granulometría (Fig. 21). Así mismo, se incluye dentro de este grupo a las rocas con contenido de material volcánico. (Sanchez, 2015).



**Figura 21.** Esquema de clasificación de las areniscas, limolitas y lutitas de acuerdo a la granulometría y su abundancia en la roca (Picard, 1971).





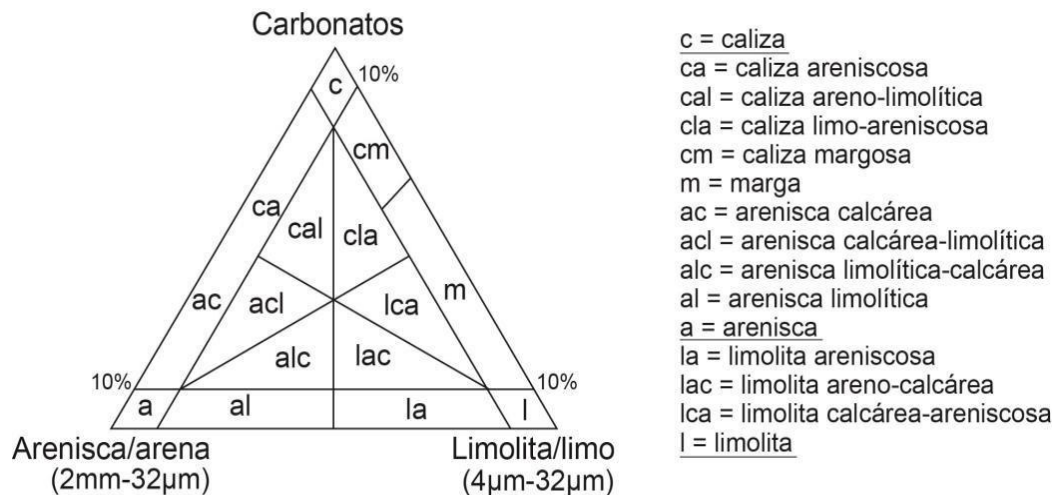
**Figura 22.** Clasificación de areniscas (arenitas y grauvas) de acuerdo a su composición. Adaptada de Dott (1964), Dickinson (1970) y Pettijohn et al. (1987). Izquierda: Q = cuarzo, F = feldespatos y L = fragmentos líticos.

	0 muy angular	1 angular	2 subangular	3 subredondeado	4 redondeado	5 muy redondeado
Alta esfericidad						
Baja esfericidad						

**Figura 23.** Grado de redondez y angulosidad de granos (sedimentos) y clastos. Tomado de Power (1953), Tucker (1991) y Pettijohn et al. (1987).

### ➤ **Rocas carbonatadas**

Para que una roca sea considerada como carbonatada, cuando está formada por más del 50% de minerales carbonatados y la composición no debe incluir el cemento. Existen tres grandes categorías de rocas definidas en la base de la composición carbonatada: calizas (predominante carbonato de calcio), dolomías (predominancia de dolomita o ankerita) y carbonatos de sodio. (Sánchez, 2015).


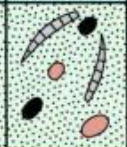



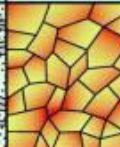


**Figura 24.** Sistemas de clasificación de rocas clásticas intermedias entre diferentes fracciones granulométricas e intermedias para rocas detríticas y carbonatadas (después de Füchtbauer, 1959).

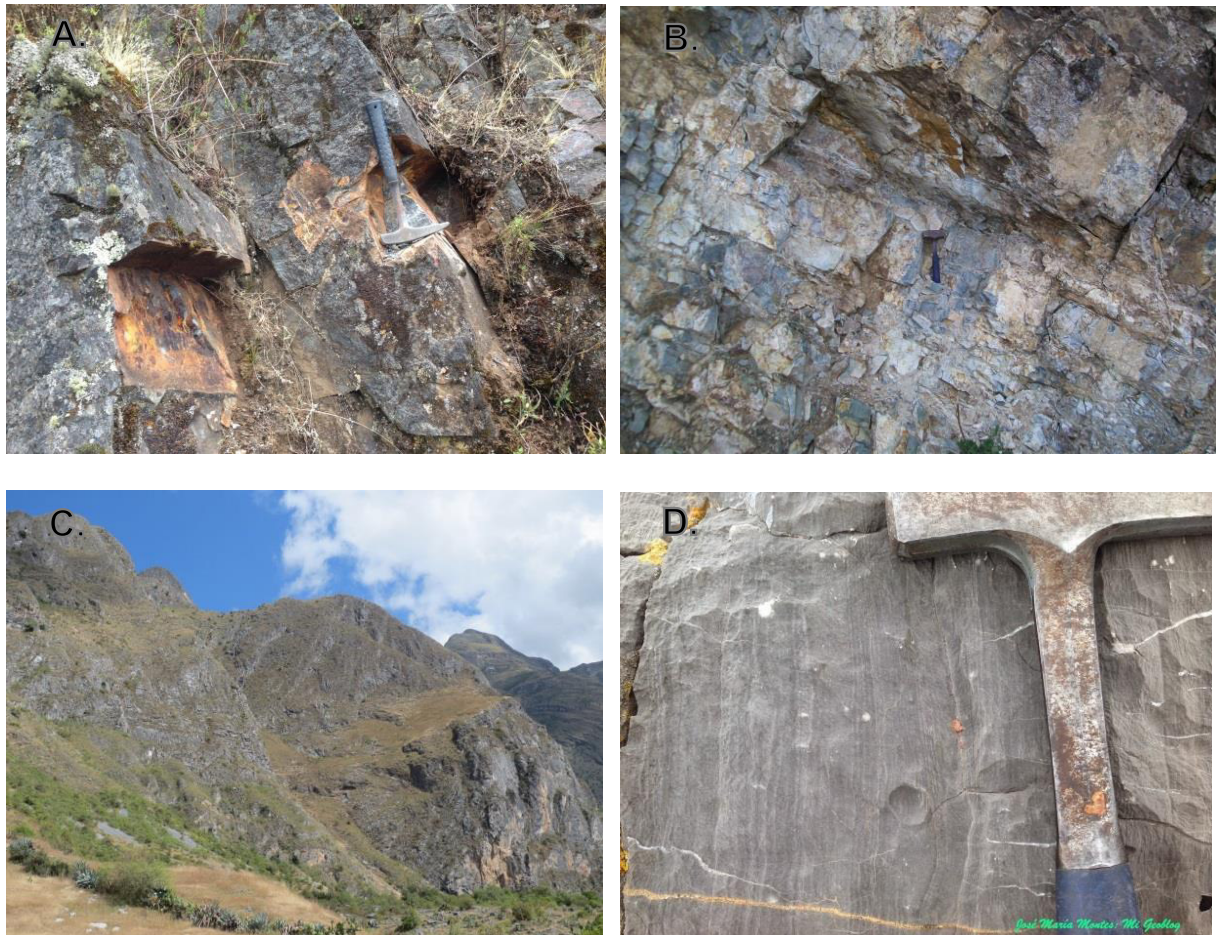
En consecuencia, se provee dos esquemas de clasificación para otorgar los nombres a las rocas carbonatadas. El esquema está basado en el tamaño de grano de los sedimentos y su aspecto textural, el cual fue propuesto por Dunham (1962) y modificado por Wright (1962).

DEPÓSITACIONAL				BIOLÓGICO	
Matriz contiene (limo/limolita y arcillas/lutitas < 32 µm)					
Soporte de Matriz		Soporte de Granos		Organismos in-situ	
>75% matriz	< 75% matriz				
Caliza Mudstone	Caliza Wackstone	Caliza Packstone	Caliza Grainstone	Caliza Boundstone	Caliza Framestone
DIAGENÉTICO					
No obliterado		Obliterado			
Textura de caliza visible	El componente principal es cemento de calcita esferulítica	Cristales Espáticos (>32µm)	Cristales microespáticos (4-32µm)	Cristales de micrita	
Uso apropiado del término raíz y del calificativo	Caliza pseudoespática	Caliza espática	Caliza microespática	Caliza micrítica	

**Tabla 6.** Clasificación de calizas usando su textura. Modificado de Dunham (1962), Embry & Klovan (1972), y Wright (1992)

Textura deposicional reconocible					Textura deposicional no reconocible
Componentes originales no unidos durante la sedimentación			Componentes originales unidos durante el desarrollo de una bioconstrucción		
Con barro micrítico		Esqueleto clasto-soportado sin barro micrítico			
Esqueleto matriz-soportado	Esqueleto grano-soportado				
< 10 % granos	> 10 % granos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Cristalina
					

**Figura 25.** Clasificación adecuada por Hallsworth & Knox (1999) para rocas carbonatadas, después de Dunham (1962), y Embry & Klovan (1971). Los esquemas mostrados en la parte inferior tienen una extensión sugerida de ~5 mm.



**Figura 26.** A) Secuencia sedimentaria de limolitas grises, presentando óxidos de hierro en fracturas (Proyecto Mamulca), B) Estratos de areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas (Prospecto Liseth 9), C y D) Afloramiento de calizas grises pertenecientes a la formación Arcurquina (anteriormente Ferrobamba), obsérvese las venillas de calcita.



#### IV. CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO

El cartografiado geológico o comúnmente denominado “mapeo” consiste en expresar y dibujar en un plano, todos los afloramientos de roca que estén inmersos en el área de estudio (incluyéndose alteraciones hidrotermales, venillas, óxidos, fallas, fracturas, entre otras). Para la ejecución de un adecuado cartografiado, se requerirá del dominio de la petrología, geología estructural y mineralogía. La finalidad e importancia del cartografiado geológico para la prospección es, el de tratar de explicar e interpretar el contexto geológico - estructural que generó la migración de fluidos mineralizantes a la superficie.

##### 4.1. Equipos de campo

Los geólogos de exploraciones necesitan una serie de artículos para desarrollar un adecuado trabajo en el campo; entre los más importantes destacan:

###### ➤ **Picota**

La picota es esencial para la ruptura de la roca en fragmentos más pequeños de superficie fresca para ser observados bajo la lupa. Entre las más usadas por los exploradores se tienen las picotas de mango corto y largo, recomendando tener mucho cuidado al momento de dar el golpe a la roca, ya que las esquirlas resultantes pueden dañar la vista.



**Figura 27.** Picotas, combas y cinceles utilizados para la prospección, cabe señalar que la picota del lado derecho es la más utilizada.

### ➤ **Brújula**

La brújula con clinómetro es la herramienta de orientación y medición del geólogo, ya que nos va ayudar a determinar el rumbo y buzamiento de estratos, vetas, mantos u otras estructuras mineralizadas; además de ubicarnos en el terreno por medio de los planos.



**Figura 28.** Grupo de brújulas utilizadas por los geólogos de acuerdo a su conveniencia. La brújula Brunton es una de la más utilizadas en exploración.

### ➤ **Lupa**

La lupa nos va ayudar a observar con mayor claridad y aumento, características que no son visibles al ojo; como los componentes mineralógicos de las rocas y minerales. Existen lupas de diferentes medidas, entre ellas se tiene las de catorce y veinte aumentos (como máximo).



**Figura 29.** Lupa de aumento X10 de la marca IWAMOTO.



➤ **GPS (Global Positioning System)**

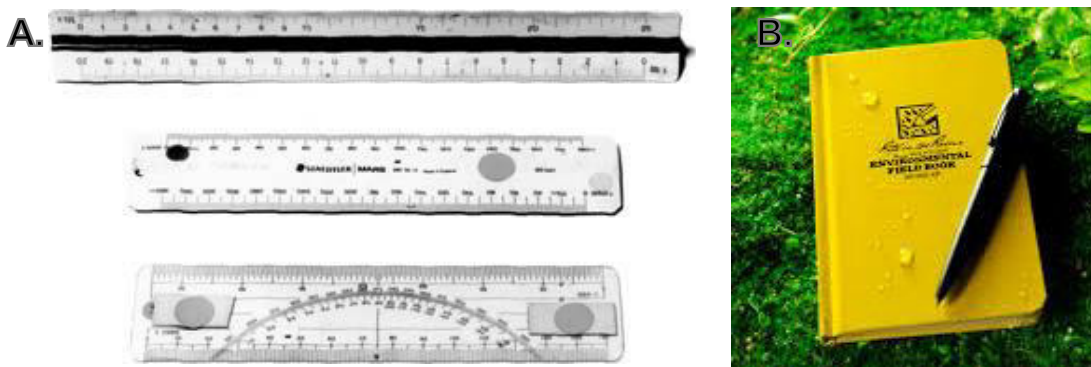
El GPS es aquél instrumento que nos indica la localización de un objeto o persona en cualquier parte del mundo, por medio del sistema de coordenadas (geográficas o UTM). Este instrumento es muy útil para ubicar con precisión ( $\pm 3$  m de error) las muestras colectadas en el campo, reconocer accesos, zonas de interés mineral o simplemente para orientarnos.



**Figura 30.** GPS de la marca GARMIN, el cual posee una precisión de  $\pm 3$  m.

➤ **Libreta de campo y otros objetos**

Es básico de los geólogos cargar su libreta de campo para anotar las observaciones realizadas en el terreno, por lo que se recomienda tener una libreta fuerte a prueba de lluvia, humedad y viento (por lo exigido de trabajo en campo). Aparte de ello cargar siempre “protectors” de diferentes escalas, lápiz, lápices de colores, tablero protector de planos, lápiz de dureza imantado, botella de ácido y ropas adecuadas para caminar bajo cualquier tipo de clima.



**Figura 31.** A) Escalímetros y protactor, B) Libreta de campo de fuerte cubierta, resistente al agua y humedad.

## **4.2 MÉTODOS DE CARTOGRAFIADO GEOLÓGICO**

Al desarrollar un cartografiado geológico en una zona que se ingresa por primera vez, se recomienda previo a ello revisar la mayor información bibliográfica, imágenes satelitales y planos, con el propósito de conocer el contexto geológico que se espera encontrar. Un reconocimiento rápido de una zona sin cartografiar a menudo se puede realizar a lo largo de carreteras y trochas, mostrando por lo general, excelentes exposiciones de los diferentes niveles estratigráficos. Así mismo, si el cartografiado se realiza en un prospecto, se sugiere recorrer los exteriores del área, con el propósito de observar unidades de roca inalteradas.

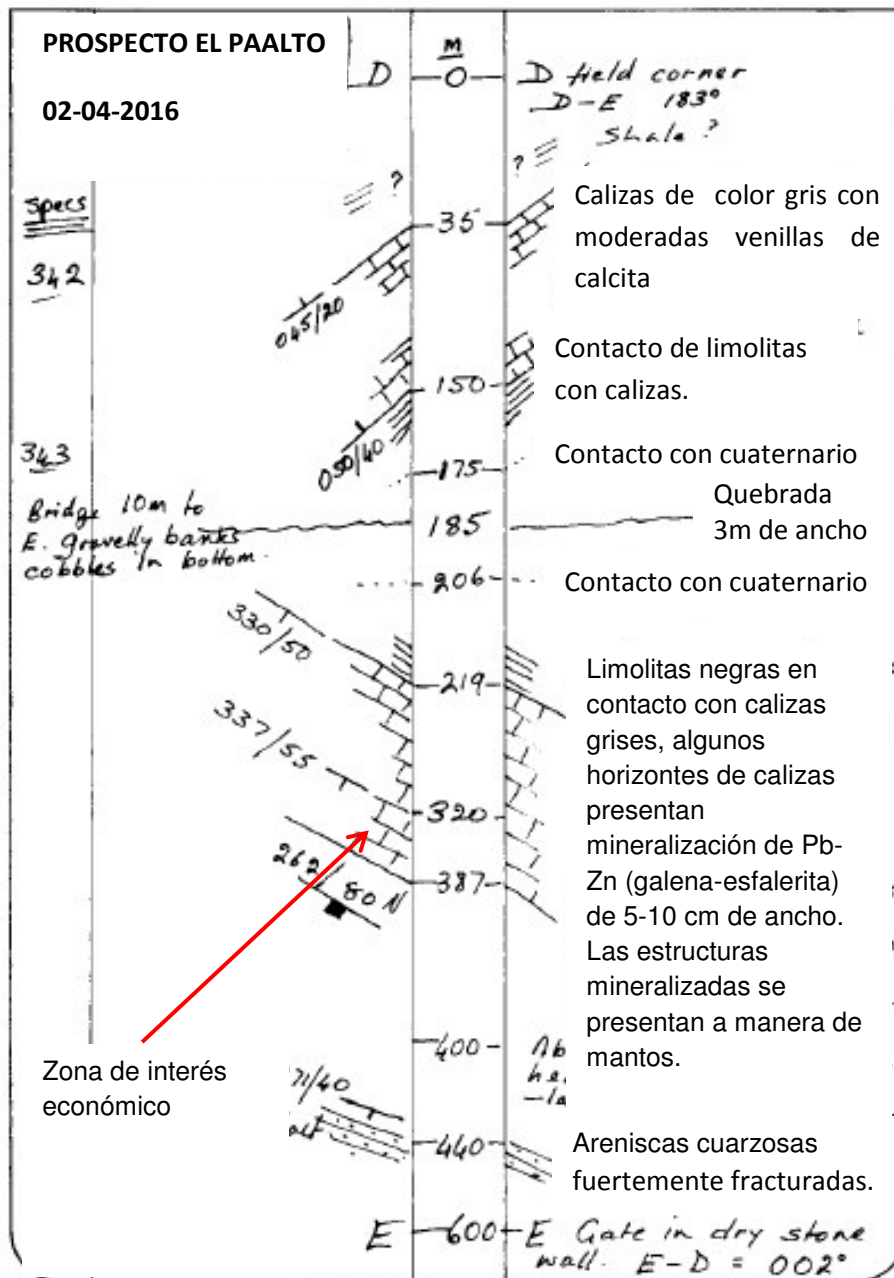
En el cartografiado se dibujarán o contornearán en un plano los siguientes componentes: afloramientos rocosos (identificando el tipo litología), alteración hidrotermal (en una transparencia sobre los polígonos de la litología), recomendando colocar el ensamble mineralógico que la compone, por ejemplo: cuarzo-sericita-pirita (alteración fílica); y las estructuras visibles, como vetas, mantos, fallas, fracturas, pliegues, brechas, etc. A continuación se presentan los métodos de cartografiado más utilizados y prácticos para desarrollar en el campo:

### **4.2.1. Sección transversal o “Travers”**

Es un buen método para controlar el progreso del cartografiado, de modo que no es necesario trasladarse hacia el inicio por cada vez que se hace una observación del afloramiento; además, se podrán cubrir las áreas con cobertura cuaternaria.

El travers consiste en caminar en línea recta (anteriormente dibujada en un plano), y trazar observaciones geológicas a lo largo del tramo (*Fig. 32*).

Las quebradas serán de ayuda para completar el cartografiado geológico, ya que éstas mostrarán por lo general, rocas que no afloran en superficie o están cubiertas por suelo o vegetación. En la densa selva de montaña, las quebradas pueden ser los únicos lugares donde se pueden localizar afloramientos, además de servir como guías de ubicación.



**Figura 32.** Ejemplo de un “traver” de unidades sedimentarias, no tiene el acho real del terreno, se utiliza simplemente para grabar la distancia desde el inicio. (tomado de Barnes y Lisle, 2004).

#### 4.2.2. Siguiendo contactos

El objetivo principal de este método es rastrear los contactos entre las diferentes formaciones rocosas. Una forma de hacer ello es seguir el contacto del afloramiento con el suelo; sin embargo, en algunas regiones, la rigurosa topografía hace que este método sea imposible de usar.

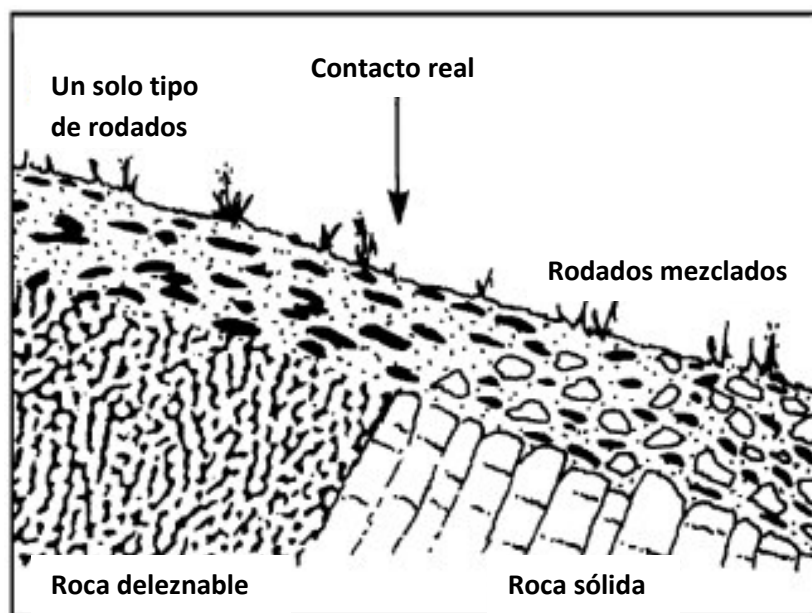
Por lo general, se utiliza el GPS para marcar múltiples puntos geodésicos del contacto, y así, obtener un cartografiado más preciso (dependiendo de la escala con la que se

esté cartografiando). Al ir caminando y observando los contactos, estos se irán dibujando en el mapa con una línea continua; la cual, se pintará a ambos lados de ésta con el color apropiado, según corresponda la litología.

En los sectores donde no se puedan observar contactos, estos serán inferidos y dibujados con líneas discontinuas; no obstante, al trazar un contacto no olvidarse del suelo o cobertura.

#### **4.2.3. Cartografiando en una zona de mayor cobertura**

Si una zona presenta escasos afloramientos o las rocas se encuentran ocultas por la abundante vegetación, es recomendable subir a un punto alto, y marcar en el plano todas las exposiciones que se puedan observar. Así mismo, los geólogos podemos inferir el tipo de roca que está debajo de la cobertura con las características que se observan en el suelo, y los rodados que contenga, por ejemplo: al examinar el suelo de una región determina, se pueden observar granos de arena con pequeños minerales de cuarzo y biotita, pues, estas evidencias infieren la presencia de un intrusivo. Con estos datos será posible completar el cartografiado de una manera sencilla, rellenando los espacios en blanco con líneas paralelas; no obstante, este método nos dará una mejor interpretación geológica del área.



**Figura 33.** Representación gráfica del cambio composicional del suelo, por medio de rodados y partículas minerales, razón por la que se infiere un cambio litológico. (Tomado de Barnes y Lisle, 2004).

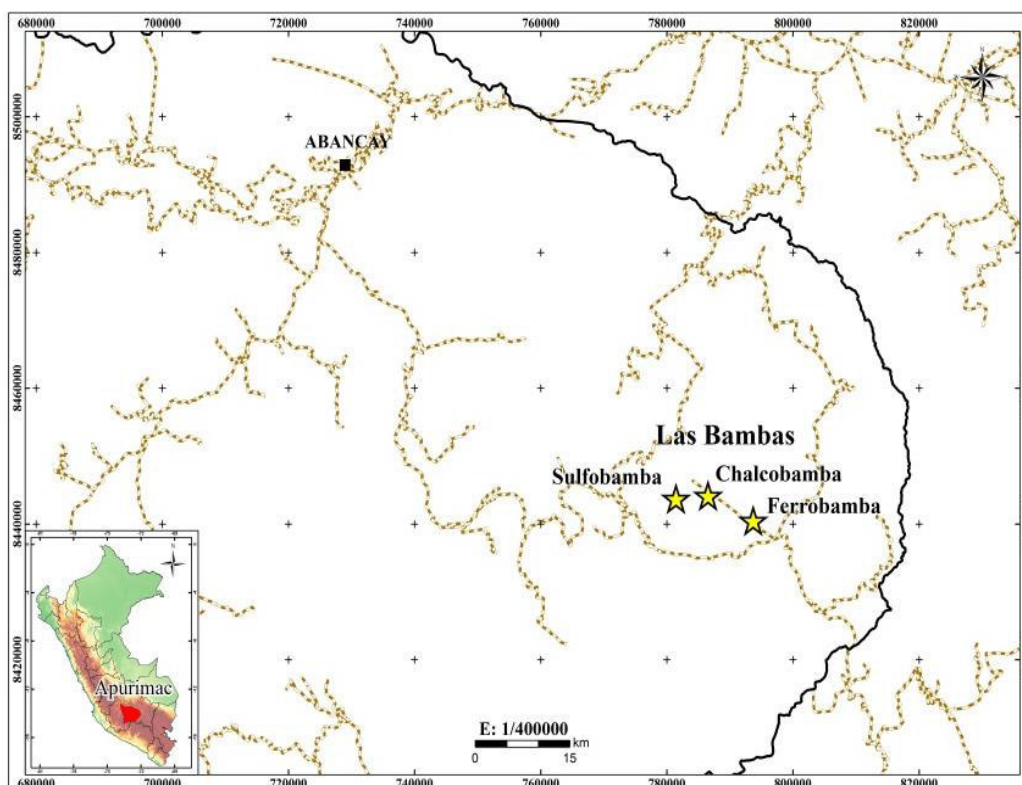
### 4.3. PLANOS BASE

Los planos base son un compendio de mapas representativos y específicos que se irán generando progresivamente durante el proceso de prospección y exploración. Estos planos serán diseñados por el geólogo, mediante el programa gráfico Arcgis 10.3; por consiguiente, el programa otorgará la posibilidad de crear una base de datos digital.

Cada plano contará con una grilla de coordenadas (preferentemente el sistema WGS84 o PSAD56, U.T.M.), barra de escala, flecha indicadora del norte y opcionalmente un rótulo. A continuación se describirán los planos que mayormente se han utilizado en prospección y exploración:

#### 4.3.1. Plano de ubicación y accesibilidad

Consiste en localizar geográficamente el prospecto, proyecto o mina; complementado con los accesos viales y centros poblados. La finalidad del plano es guiar y orientar a los profesionales que desconocen la ruta hacia zona de estudio señalada.

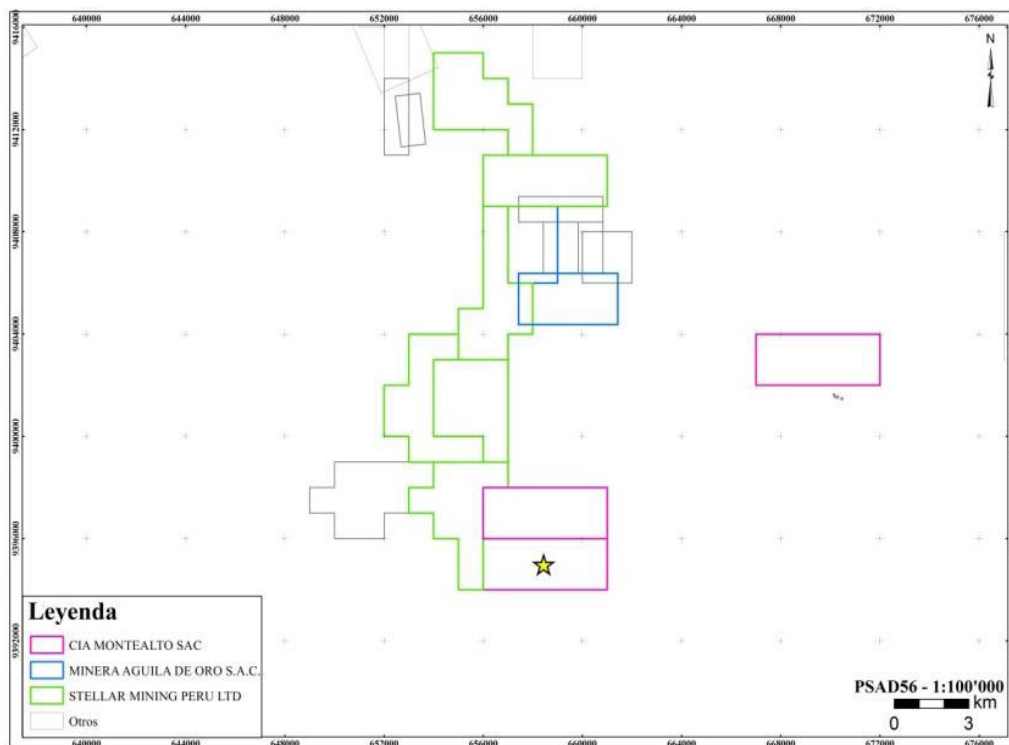


**Figura 34.** Plano de ubicación y accesibilidad de la Unidad Minera Las Bambas, nótese los accesos viales y localidades cercanas.

#### 4.3.2. Plano de petitorios mineros

Es un plano visual provisto del catastro minero actualizado. El archivo de petitorios mineros del Perú se puede descargar del Sistema Geológico y Catastral Minero (GEOCATMIN), de página web: <http://geocatminapp.ingemmet.gob.pe/apps/geocatmin/>

El objetivo del plano es el de observar las áreas libres a denunciar, o que empresas mineras y personas naturales (terceros) están circundando nuestro petitorio.

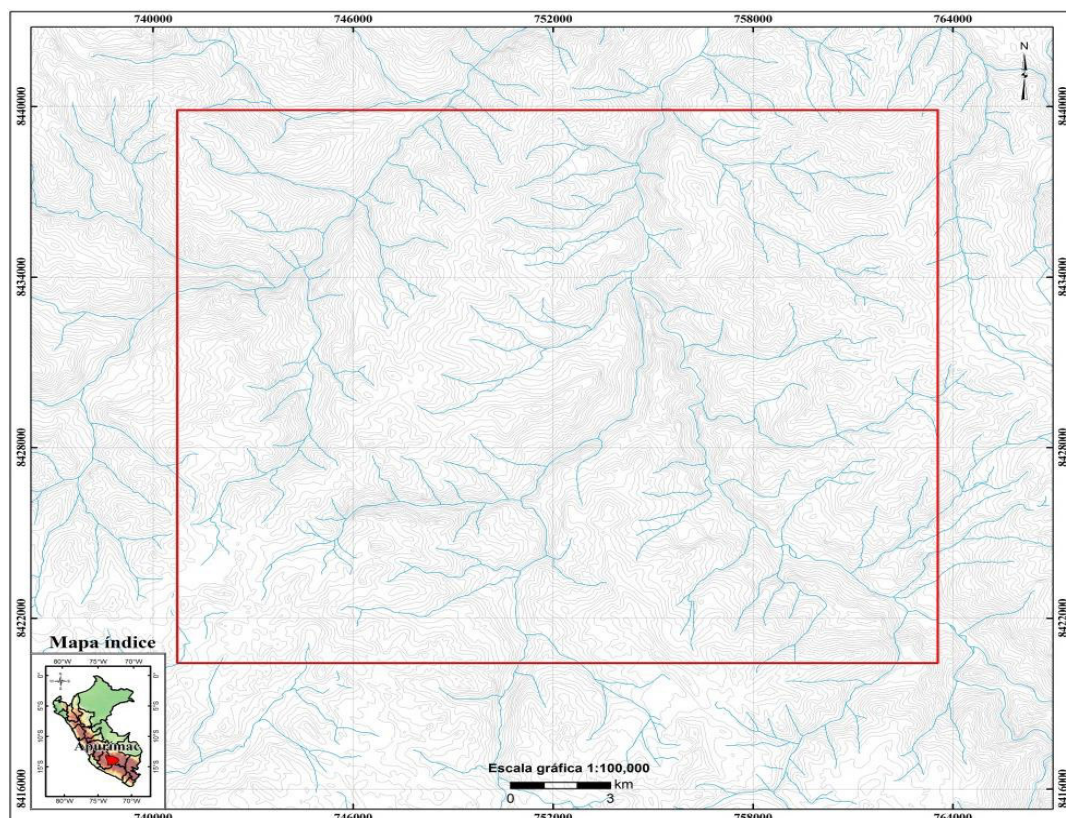


**Figura 35.** Plano catastral de la zona de Canchaque, Piura; se observa resaltado los petitorios mineros de la C.I.A Montealto.

#### 4.3.3. Plano de cuencas hidrográficas y el área de estudio

Se expone todo lo referente a la hidrografía (ríos, lagos y quebradas) y topografía (curvas de nivel). Es un plano ideal para la planificación de la toma de muestras de sedimentos, mediante la delimitación de cuencas hidrográficas y número de orden de quebradas.



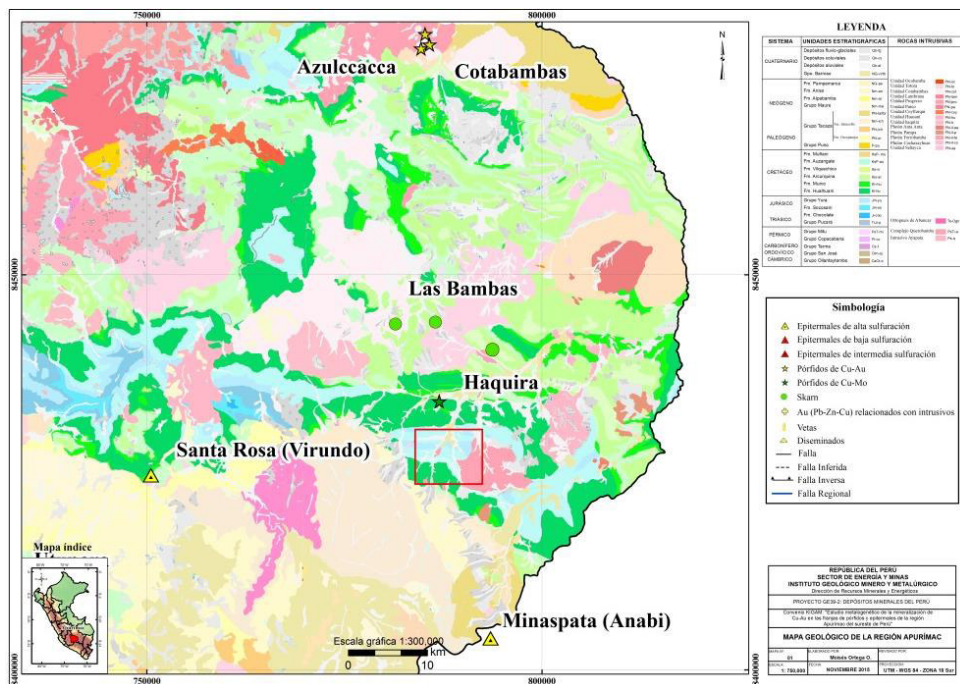


**Figura 36.** Plano de cuencas hidrográficas más topografía, el área de estudio está señalada por el polígono de color rojo; región de Apurímac.

#### 4.3.4. Plano geológico regional - metalotecto y las ocurrencias de mineralización

El plano de geología regional es aquel que expone todas las unidades de rocas cartografiadas a escala 1:100,000 (generalizadas en formaciones y grupos); así mismo, esta herramienta nos indicará el ambiente geológico - metalotecto que presente el área de estudio.

Adicionalmente se incluirá todas las ocurrencias minerales (indicios de mineralización, prospectos, proyectos y minas) localizadas hasta el momento; pues, toda esta información demostrará un posible potencial económico del área que se desea investigar.

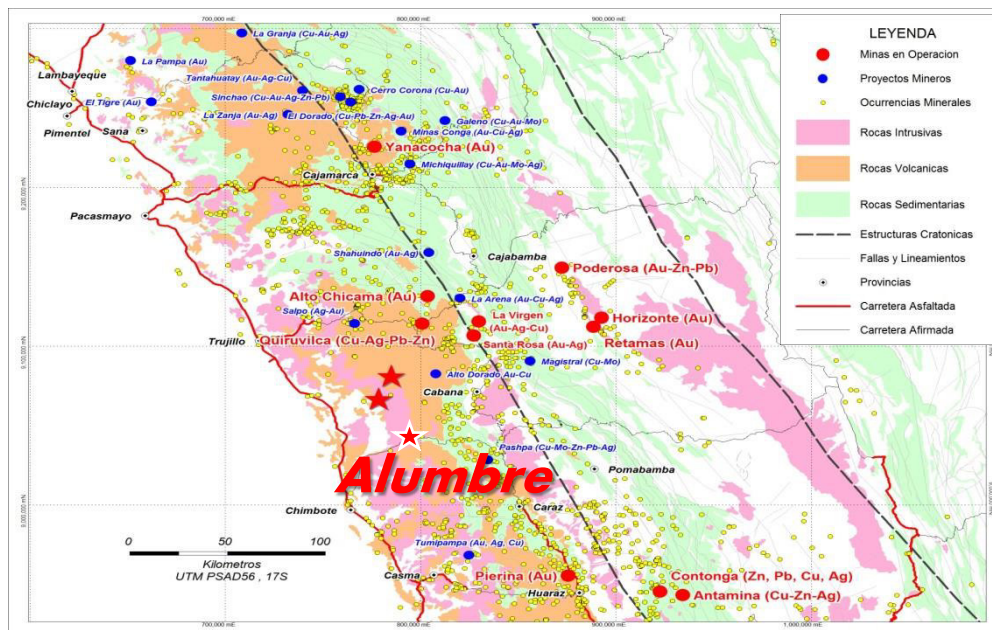


#### 4.3.5. Plano regional de lineamientos estructurales y ocurrencias de mineralización

Los lineamientos estructurales regionales son grandes fallas o fracturas que presentan un largo recorrido (de kilómetros), y muchas veces son los que controlan el emplazamiento de las ocurrencias minerales; no obstante, los lineamientos estructurales regionales serán materia de importancia metalogenética para los geólogos de exploración.

Acompañando a los lineamientos estructurales irán las ocurrencias minerales, el propósito de la generación de este plano es el de visualizar y proyectar las estructuras controladoras de la mineralización de un depósito cercano al área de estudio que estemos analizando; como también generar nuevos blancos de exploración.



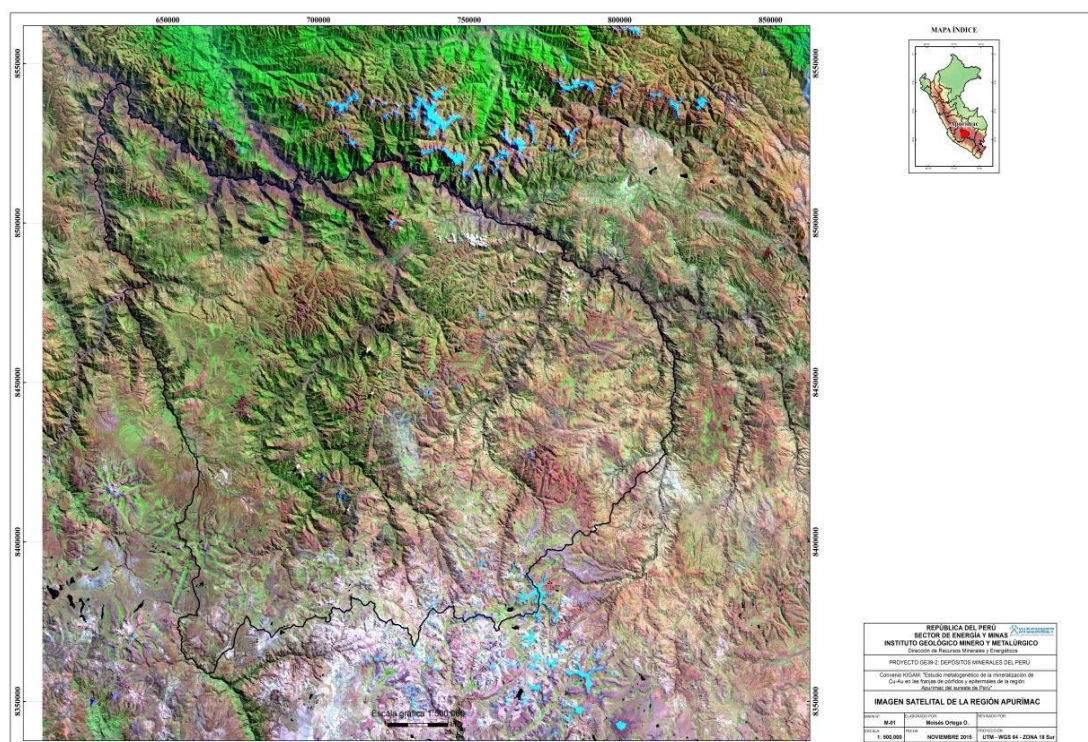


**Figura 38.** Plano de lineamientos estructurales regionales junto a ocurrencias minerales, Proyecto Alumbre.

#### 4.3.6. Plano satelital regional

Las imágenes satelitales son fotografías capturadas desde el espacio por el satélite, cuya función básica es el de ayudar a visualizar estructuras geológicas a una escala regional y detectar minerales de alteración hidrotermal (arcillas, óxidos, entre otros).

Entre las más utilizadas están: las imágenes satelitales Landsat y ASTER.

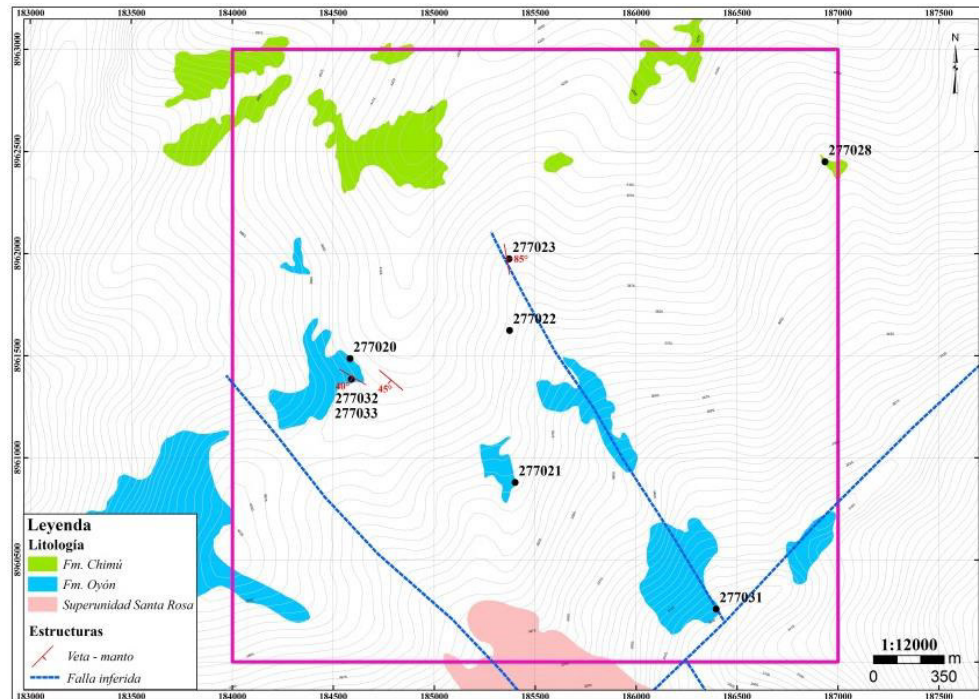


**Figura 39.** Plano satelital Landsat de la región Apurímac.

#### 4.3.7. Plano litológico local

Este plano se generó como el resultado del cartografiado geológico a escala 1:5000 o 1:2000 de un prospecto, el cual representará las diferentes unidades litológicas por colores.

Todo ello estará expuesto en la leyenda por orden cronológico, y dividido según los tipos de roca (ígneas, sedimentarias y metamórficas).



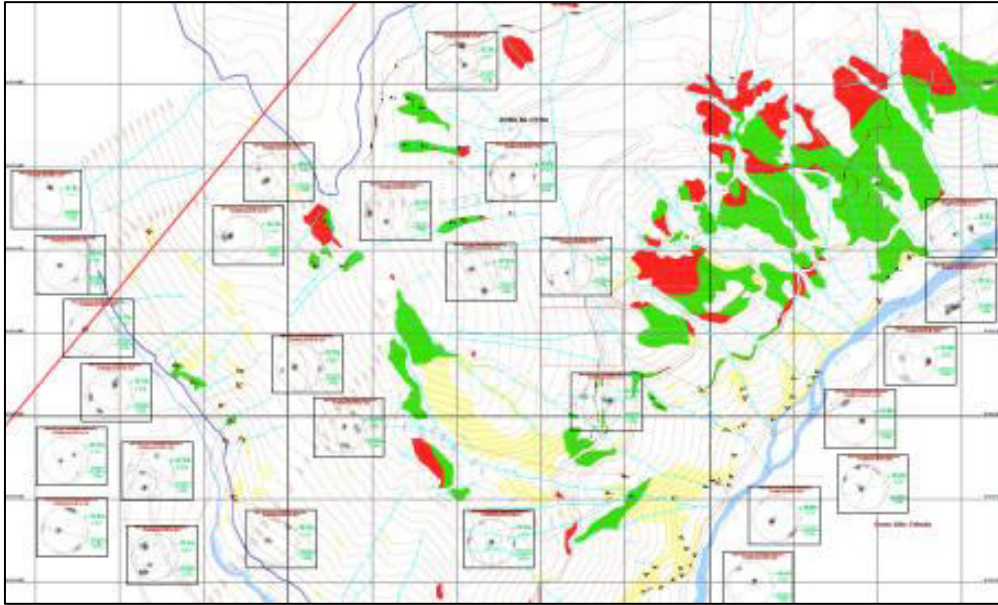
**Figura 40.** Plano litológico local del prospecto Liseth (Ancash).

#### 4.3.8. Plano de densidad de fracturamiento

En el campo se realizará el cartografiado y reconocimiento de las familias de fracturas, venillas y vetillas, producidas en el área de estudio. Se determinará el azimut y buzamiento de cada una de ellas (preferiblemente utilizar la regla de la mano derecha para agilizar el trabajo), con el objetivo de analizar la cinemática de los esfuerzos generadores de la mineralización.

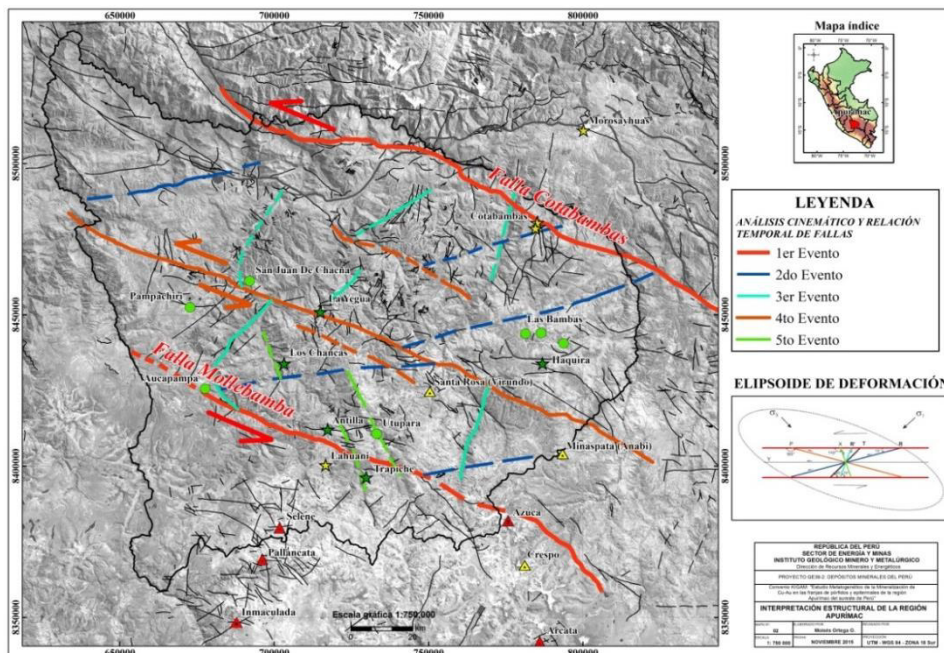
El programa “dips direction” es la herramienta práctica para determinar las familias de fracturas y densidad, todo ello representado en proyecciones estereográficas.





#### 4.3.9. Plano estructural

El plano estructural es el resultado del cartografiado de fallas, fracturas, pliegues, lineamientos, entre otros; que busca explicar y comprender los procesos de deformación y cinemática que afectaron una determinada área. Este plano puede ser respaldado con la imagen satelital ASTER para obtener una mejor interpretación estructural; no obstante, será una herramienta fundamental en determinar la procedencia de los fluidos mineralizantes.

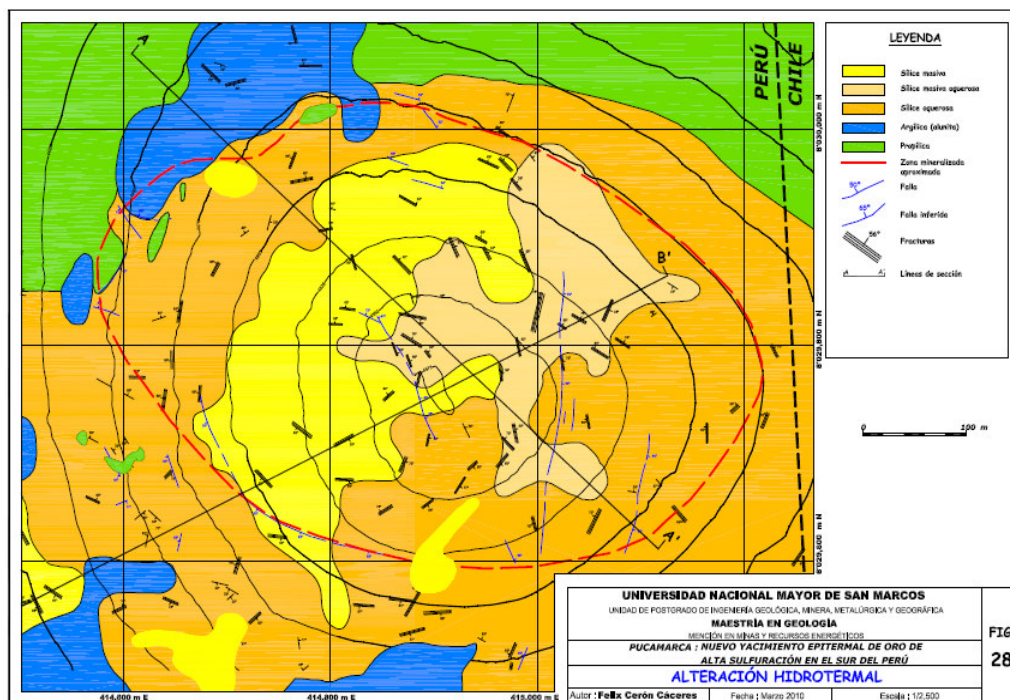


#### 4.3.10. Plano de alteraciones hidrotermales

El siguiente plano expone las alteraciones hidrotermales cartografiadas, señalando el ensamble mineralógico que las componen. Cada tipo de alteración estará graficada con un color adecuado (*Fig. 43*), y siempre estarán limitados por los polígonos de litología anteriormente cartografiados.

El objetivo del plano es focalizar la fuente mineral, por medio de la vectorización de temperatura. La temperatura y el ph del fluido son los más importantes de los factores que influyen en la mineralogía de los sistemas hidrotermales; al tener conocimiento de esto, se buscará direccionar los minerales de baja temperatura hacia los de alta temperatura.

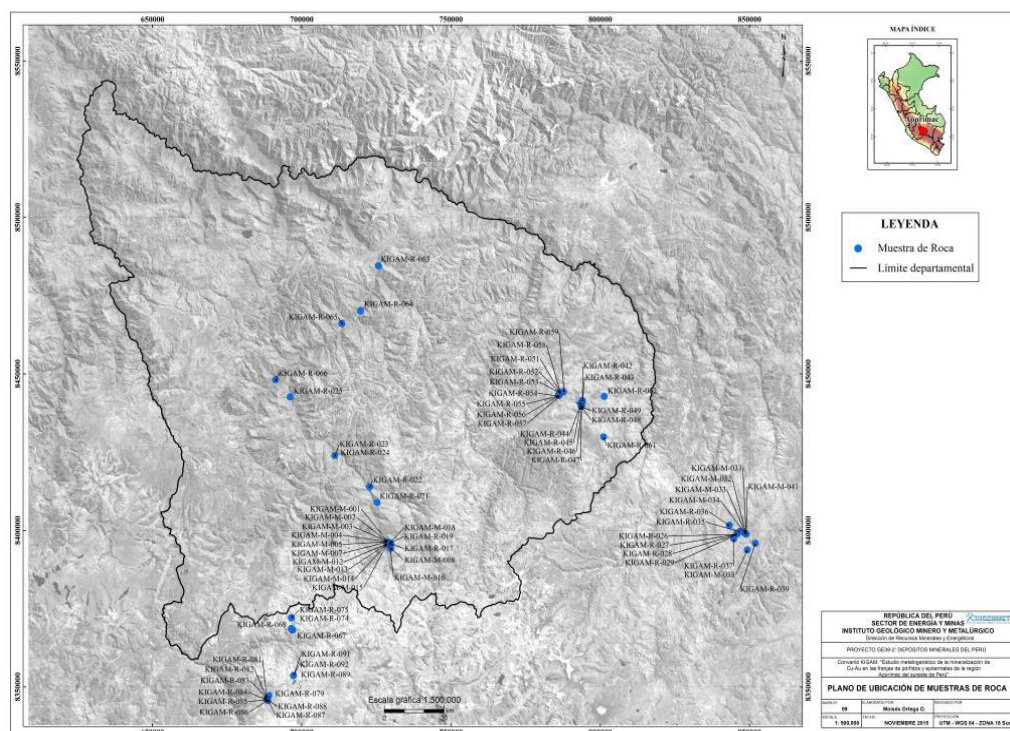
El espectrómetro de reflectancia denominado PIMA o TERRASPEC es un instrumento que tiene la función de medir en diferentes longitudes de onda la energía electromagnética reflejada por la superficie del material y representarla con la forma de un gráfico que se denomina **curva de reflectancia espectral** (o espectro de reflectancia), esta determinará con más precisión las especies minerales constituyentes de la alteración hidrotermal.



**Figura 43.** Plano de alteraciones hidrotermales, observe la focalización de la alteración (tomado de la tesis de F. Toribio, "Pucamarca: Nuevo yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración al sur del Perú").

#### 4.3.11. Plano de ubicación de muestras

Consiste en mostrar la ubicación de las muestras colectadas en una determinada campaña o área. Este plano será la base para la realización de los planos geoquímicos.



**Figura 44.** Plano de ubicación de muestras de roca, colectadas en una campaña de reconocimiento; cada muestra contará con su código.

#### 4.3.12. Plano geoquímico de Au y multielementos

El plano geoquímico de oro y multielementos es aquel que mostrará la ubicación geográfica (por medio de símbolos) de las muestras colectadas en una determinada campaña de muestreo con los valores metálicos o leyes obtenidas del análisis químico.

Para generar un óptimo plano geoquímico hay que realizar una serie de procedimientos, el cual inicia con el cálculo estadístico y tratamiento de los valores en ppm (partes por millón) o ppb (partes por billón) de cada elemento (ver comportamiento estadístico y anomalías geoquímicas). El resultado final serán los rangos geoquímicos de cada elemento, el cual estarán representados en diferentes colores y tamaños. (Fig. 45)



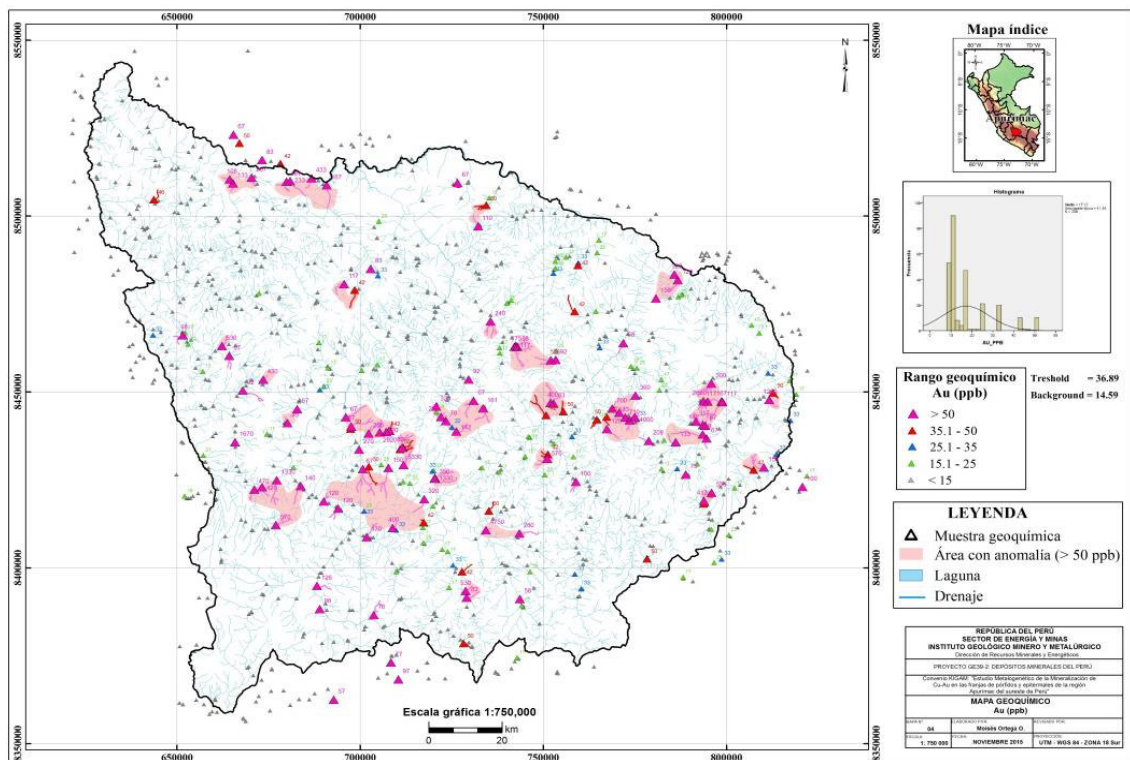


Figura 45. Plano de anomalías geoquímicas de Au de sedimentos de quebrada.

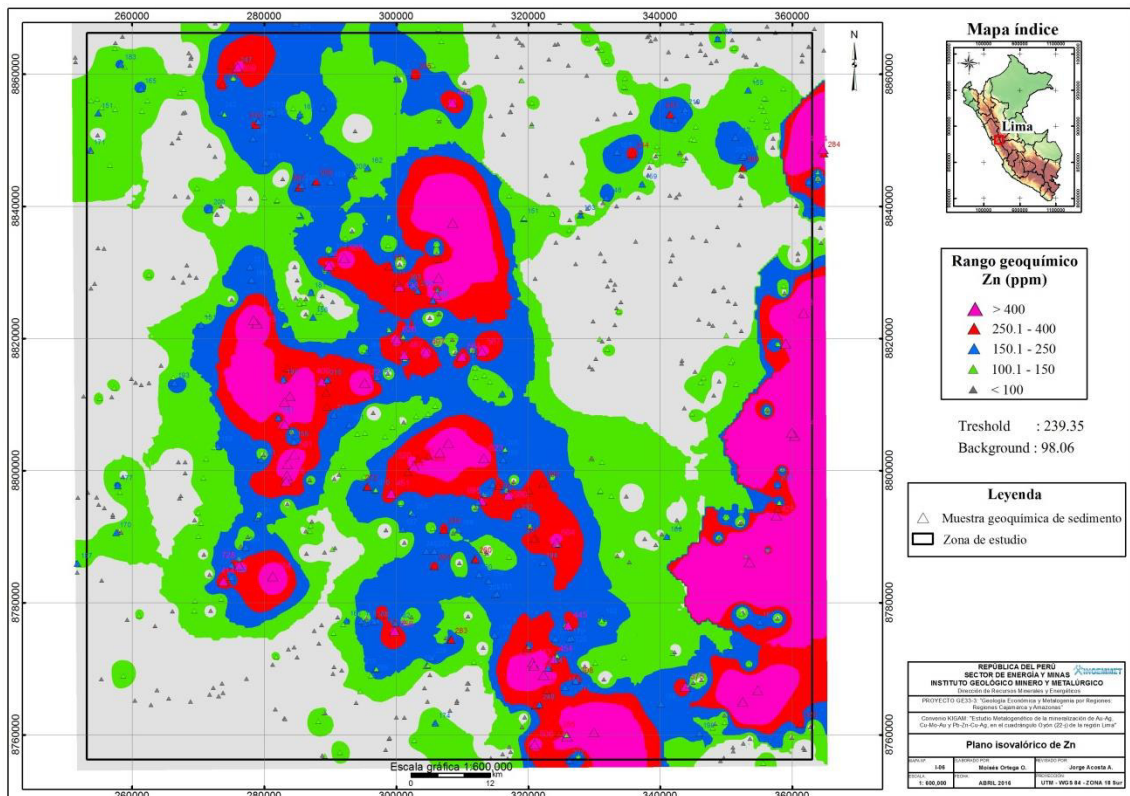


Figura 46. Plano isovalórico de anomalías geoquímicas de Au de rocas.

La geoquímica es una disciplina que utiliza en forma conjunta el conocimiento y la comprensión de los principios y procesos de la química y la geología, para resolver problemas teóricos y aplicados. (Sieguel, 1992)

El uso de la geoquímica para la búsqueda de recursos minerales, ha tenido éxito en diferentes partes del mundo. Las técnicas utilizadas en la aplicación geoquímica, para la localización y delimitación de ocurrencias minerales metálicas, han demostrado ser rápidas, prácticas y económicas.

La disposición y ordenamiento de los elementos químicos por su número atómico, configuración de electrones y propiedades químicas se encuentran agrupados en la tabla periódica.

1																	2						
1 <b>H</b> Hidrógeno 1.008																	2 <b>He</b> Helio 4.003						
3 <b>Li</b> Litio 6.941	4 <b>Be</b> Berilio 9.012																	5 <b>B</b> Boro 10.811	6 <b>C</b> Carbono 12.011	7 <b>N</b> Nitrógeno 14.007	8 <b>O</b> Oxígeno 15.999	9 <b>F</b> Flúor 18.998	10 <b>Ne</b> Neón 20.180
11 <b>Na</b> Sodio 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesio 24.305																	13 <b>Al</b> Aluminio 26.982	14 <b>Si</b> Silicio 28.086	15 <b>P</b> Fósforo 30.974	16 <b>S</b> Azufre 32.064	17 <b>Cl</b> Cloro 35.453	18 <b>Ar</b> Argón 39.948
19 <b>K</b> Potasio 39.098	20 <b>Ca</b> Calcio 40.078	21 <b>Sc</b> Escandio 44.956	22 <b>Ti</b> Titanio 47.88	23 <b>V</b> Vanadio 50.942	24 <b>Cr</b> Cromo 51.996	25 <b>Mn</b> Manganeso 54.938	26 <b>Fe</b> Hierro 55.833	27 <b>Co</b> Cobalto 58.933	28 <b>Ni</b> Níquel 58.693	29 <b>Cu</b> Cobre 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.39	31 <b>Ga</b> Galio 69.723	32 <b>Ge</b> Germanio 72.61	33 <b>As</b> Arsénico 74.922	34 <b>Se</b> Selenio 78.96	35 <b>Br</b> Bromo 79.904	36 <b>Kr</b> Kriptón 83.80						
37 <b>Rb</b> Rubidio 84.468	38 <b>Sr</b> Estroncio 87.62	39 <b>Y</b> Ytrio 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconio 91.224	41 <b>Nb</b> Niobio 92.906	42 <b>Mo</b> Molibdeno 95.94	43 <b>Tc</b> Tecnecio 98.907	44 <b>Ru</b> Rutenio 101.07	45 <b>Rh</b> Rodio 101.06	46 <b>Pd</b> Paladio 106.42	47 <b>Ag</b> Plata 107.868	48 <b>Cd</b> Cadmio 112.411	49 <b>In</b> Indio 114.818	50 <b>Sn</b> Estanho 118.71	51 <b>Sb</b> Antimonio 121.760	52 <b>Te</b> Telurio 127.4	53 <b>I</b> Yodo 126.905	54 <b>Xe</b> Xenón 131.29						
55 <b>Cs</b> Cesio 132.905	56 <b>Ba</b> Bario 137.327	57-71 Lantánidos	72 <b>Hf</b> Hafnio 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalio 180.948	74 <b>W</b> Wolframio 183.85	75 <b>Re</b> Renio 186.207	76 <b>Os</b> Osmio 190.23	77 <b>Ir</b> Iridio 192.22	78 <b>Pt</b> Platino 195.08	79 <b>Au</b> Oro 196.967	80 <b>Hg</b> Mercurio 200.59	81 <b>Tl</b> Talio 204.383	82 <b>Pb</b> Plomo 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuto 208.980	84 <b>Po</b> Polonio (209)	85 <b>At</b> Astato 209	86 <b>Rn</b> Radón 222						
87 <b>Fr</b> Francio 223	88 <b>Ra</b> Radio 226	89-103 Actínidos	104 <b>Rf</b> Rutherfordio (261)	105 <b>Db</b> Dubnio (262)	106 <b>Sg</b> Seaborgio (266)	107 <b>Bh</b> Bohrio (264)	108 <b>Hs</b> Hassium (277)	109 <b>Mt</b> Meitnerio (268)	110 <b>Ds</b> Darmstadtio (271)	111 <b>Rg</b> Roentgenio (272)	112 <b>Cn</b> Copernicio (285)	113 <b>Uut</b> Ununtrio desconocido	114 <b>Fl</b> Flerovio (289)	115 <b>Uup</b> Ununpentio desconocido	116 <b>Lv</b> Livermorio (293)	117 <b>Uus</b> Ununseptio desconocido	118 <b>Uuo</b> Ununoctio desconocido						
57 <b>La</b> Lantano 138.906	58 <b>Ce</b> Cerio 140.115	59 <b>Pr</b> Praseodimio 140.908	60 <b>Nd</b> Neodimio 144.24	61 <b>Pm</b> Prometio 144.912	62 <b>Sm</b> Samario 150.36	63 <b>Eu</b> Europio 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinio 157.25	65 <b>Tb</b> Terbio 158.925	66 <b>Dy</b> Dysprosio 162.50	67 <b>Ho</b> Holmio 164.930	68 <b>Er</b> Erbio 167.26	69 <b>Tm</b> Tercio 168.934	70 <b>Yb</b> Ytterbio 173.04	71 <b>Lu</b> Lutecio 174.967									
89 <b>Ac</b> Actinio 227.028	90 <b>Th</b> Torio 232.038	91 <b>Pa</b> Protactinio 231.036	92 <b>U</b> Uranio 238.029	93 <b>Np</b> Neptunio 237.048	94 <b>Pu</b> Plutonio 244.064	95 <b>Am</b> Americio 243.061	96 <b>Cm</b> Curcio 247.070	97 <b>Bk</b> Berkelio 247.070	98 <b>Cf</b> Californio 251.080	99 <b>Es</b> Einsteinio 252.083	100 <b>Fm</b> Fermio 257.095	101 <b>Md</b> Mendelevio 258.1	102 <b>No</b> Nobelio 259.101	103 <b>Lr</b> Lawrencio 260.101									

69

## 5.2. Abundancia promedio de elementos en la corteza terrestre

En la siguiente tabla se exponen los valores promedios de los elementos constituyentes de la corteza terrestre y rocas.

Elemento	Corteza Terrestre	Ultra-máfico	Basalto	Grano-diorita	Granito	Lutita	Caliza	Suelo	Agua de río
Ag	0.07	0.06	0.1	0.07	0.04	0.05	1	0.1	0.3
As	1.8	1	2	2	1.5	15	2.5	1-50	2
Au	0.004	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005	— <sup>a</sup>	0.002
B	10	5	5	20	15	100	10	2-100	10
Ba	425	2	250	500	600	700	100	100-3000	10
Be	2.8	—	0.5	2	5	3	1	6	—
Bi	0.17	0.02	0.15	—	0.1	0.18	—	—	—
Br	2.5	1	3.6	—	2.9	4	6.2	—	20
Cd	0.2	—	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	1	—
Ce	60	8	35	40	46	50	10	—	0.06
Cl	130	85	60	—	165	180	150	—	7800
Co	25	150	50	10	1	20	4	1-40	0.2
Cr	100	2000	200	20	4	100	10	5-1000	1
Cs	3	—	1	2	5	5	—	6	0.02
Cu	55	10	100	30	10	50	15	2-100	7
Dy	3	0.59	3	3.2	0.5	5	0.4	—	0.05
Er	2.8	0.36	1.69	4.8	0.2	2	0.5	—	0.05
Eu	1.2	0.16	1.27	1.2	—	1	—	—	0.07
F	625	100	400	—	735	740	330	—	100
Ga	15	1	12	18	18	20	0.06	15	0.09
Gd	5.4	0.65	4.7	7.4	2	6	0.6	—	0.04
Ge	1.5	1	1.5	1	1.5	1.5	0.1	1	—
Hf	3	0.5	2	2	4	3	0.5	—	—
Hg	0.08	—	0.08	0.08	0.08	0.5	0.05	0.03	0.007
Ho	1.2	0.14	0.64	1.6	0.07	1	0.1	—	0.01
I	0.5	0.5	0.5	—	0.5	2.2	1.2	—	7
In	0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1	0.02	—	—
Ir	0.0004	—	—	—	—	—	—	—	—
La	30	3.3	10.5	36	25	20	6	—	0.2
Li	20	—	10	25	30	60	20	5-200	3
Lu	0.50	0.064	0.20	—	0.01	0.5	—	—	0.008
Mn	950	1300	2200	1200	500	850	1100	850	7
Mo	1.5	0.3	1	1	2	3	1	2	1
Nb	20	15	20	20	20	20	—	—	—
Nd	28	3.4	17.8	26	18	24	3	—	0.2
Ni	75	2000	150	20	0.5	70	12	5-500	0.3
Os	0.0004	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	12.5	0.1	5	15	20	20	8	2-200	3
Pd	0.004	0.02	0.02	—	0.002	—	—	—	—
Pr	8.2	1.02	3.9	8.5	4.6	6	1	—	0.03
Pt	0.002	0.02	0.02	—	0.008	—	—	—	—
Rb	90	—	30	120	150	140	5	20-500	1
Re	0.0005	—	0.0005	—	0.0005	—	—	—	—
Rh	0.0004	—	—	—	—	—	—	—	—
Ru	0.0004	—	—	—	—	—	—	—	—
Sb	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	1	—	5	1
Sc	16	10	38	10	5	15	5	—	0.004
Se	0.05	—	0.05	—	0.05	0.6	0.08	0.2	0.2
Sm	6	0.57	4.2	6.8	3	6	0.8	—	0.03
Sn	2	0.5	1	2	3	4	4	10	—
Sr	375	1	465	450	285	300	500	50-1000	50
Ta	2	1	0.5	2	3.5	2	—	—	—
Tb	0.9	0.088	0.63	1.3	0.05	1	—	—	0.008
Te	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01	—	—	—
Th	10	0.003	2.2	10	17	12	2	13	0.1
Ti	5700	3000	9000	8000	2300	4600	400	5000	3
Tl	0.45	0.05	0.1	0.5	0.75	0.3	—	0.1	—
Tm	0.48	0.053	0.21	0.5	—	0.2	0.1	—	0.009
U	2.7	0.001	0.6	3	4.8	4	2	1	0.4
V	135	50	250	100	20	130	15	20-500	0.9
W	1.5	0.5	1	2	2	2	0.5	—	0.03
Y	30	—	25	30	40	25	15	—	0.7
Yb	3	0.43	1.11	3.6	0.06	3	0.1	—	0.05
Zn	70	50	100	60	40	100	25	10-300	20
Zr	165	50	150	140	180	160	20	300	—

**Tabla 8.** Todos los valores están en ppm a excepción de las aguas de río (A. Levinson, 1974).



### 5.3. Promedio de elementos trazas en suelos

El siguiente gráfico muestra los elementos traza presentes en el suelo común. Los valores en ppm de cada elemento se muestran mediante una línea sólida continua, y los valores inusuales se muestran con líneas discontinuas.

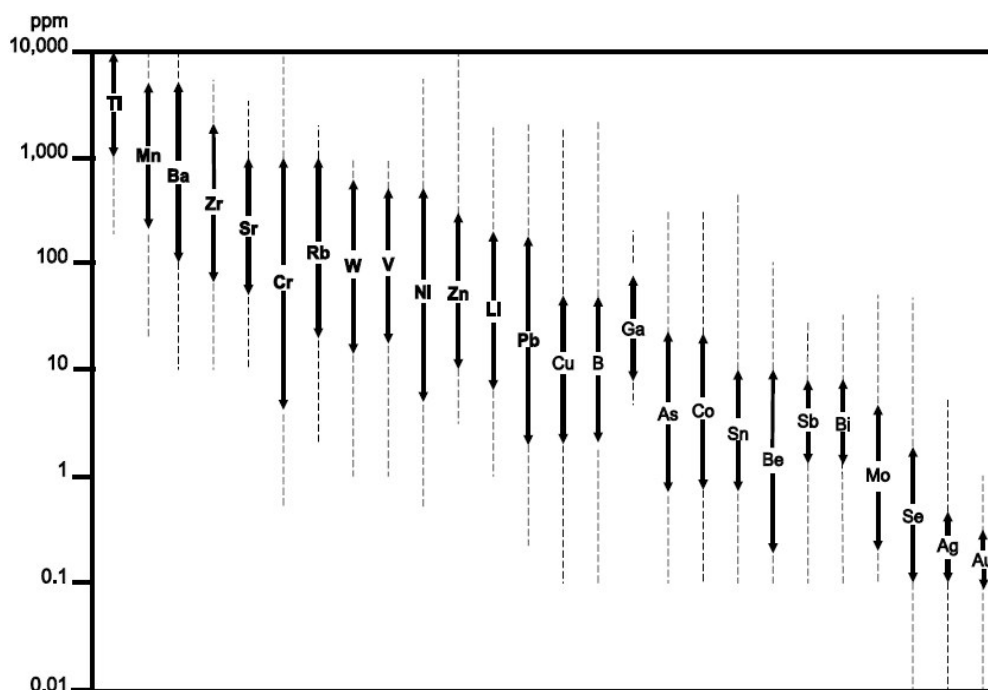


Figura 47. Promedio de elementos traza en suelos (Swaine, D. 1955).

### 5.4. Agrupación geoquímica de elementos

Según Goldschmidt, compiló los datos sobre la distribución de los elementos químicos en materiales naturales, reconoció las asociaciones elementales según la clase de material, y formalizó el concepto de afinidad de los elementos químicos de las fases fundamentales que componen la Tierra. Así mismo los agrupó de la siguiente manera: elementos siderófilos, son aquellos que no se combinan cuando están en el estado metálico y son ricos en electrones libres (Fe, Ni y Co; Ru, Rh y Pd; Re, Os, Ir y Pt), elementos calcófilos, son aquellos que tienden a formar enlaces covalentes y muy a menudo se unen al azufre en los sulfuros (S, Se y Te; Cu, Zn y Cd; As, Sb y Bi; Ag y Hg) y elementos litófilos, aquellos que tienden a formar enlaces iónicos por lo general en los silicatos (Li, Na, K, Rb y Cs; Be, Mg, Ca, Sr y Ba; Ti, Zr, Hf y Th; B, Al, Ga y tierras raras). Esta agrupación elemental de dos o tres elementos químicos (o más de tres) es un factor muy importante en geoquímica aplicada; utilizado generalmente en estudios de prospección.

<b>Metales de mena, mineralogía y sus casos geológicos</b>		
<b>Metal</b>	<b>Mineralogía</b>	<b>Caso geológico</b>
Al	Bauxita	Suelos tropicales profundamente meteorizados
Sb	Estibina, Tetrahedrita	Yacimientos hidrotermales de baja temperatura
Bi	Bismuto, Bismutina	Menas hidrotermales a menudo con Sn cuando están con granitos o con Co, Ni, As, Ag.
Cd	Blenda	Menas estratiformes hidrotermales de baja temperatura
Cr	Cromita	Capas acumuladas en rocas ultramáficas estratificadas
Co	Cobaltita, eskuterita pentlandita	Vetas hidrotermales, sedimentos de reduzatos
Cu	Cobre, calcosita, calcopirita, bornita, covelita	Menas hidrotermales relacionadas con rocas porfíricas intermedias a ácidas.
Au	Oro, calaverita, silvanita	Vetas hidrotermales, pegmatitas, placeres
Fe	Magnetita, hematita, siderita, limonita, hidróxidos de hierro	Segregaciones en anortositas, inyecciones magmáticas, zonas metasómicas de contacto.
Pb	Galena	Vetas hidrotermales y reemplazos
Mn	Pirolusita, psilomelanos	Secundarios en zonas muy meteorizadas, pantanos y lagos, nódulos del fondo oceánico
Hg	Mercurio	Hidrotermal de baja temperatura, manantiles calientes y rocas volcánicas relacionadas
Mo	Molibdenita	Diseminación en rocas volcánicas porfíricas
Ni	Pentlandita, garnierita	Segregación inmisible de sulfuros de Fe-Ni de magmas máficos.
Pt	Metales nativos y aleaciones	Acumulación en rocas ultrabásicas
Ag	Plata, argentita, galena, tannantita	Vetas hidrotermales, zonas supergénicas
Sn	Casiterita, Estannita	Vetas hidrotermales, placeres
Ti	Rutilo, ilmenita	Rocas subsilícicas, placeres.
W	Wolframita, scheelita	Vetas hidrotermales magmáticas tardías a veces con menas metasómicas de contacto
U	Uraninita, carnotita	Vetas hidrotermales y arenisca "roll-type"
V	Roscoelita	Arenisca "roll-type"
Zn	Blenda, willemite, franklenita	Vetas hidrotermales estratiformes.

**Tabla 9.** Metales de mena, mineralogía y casos geológicos, (modificada de Craig, 1979).

## 5.5 Geoquímica en los tipos de yacimientos minerales

La utilización de las afinidades elementales, dependerá del conocimiento de otras relaciones genéticas; como por ejemplo: entre los metales de menas, mineralogía y modo de ocurrencia (*Tabla 9*); y de cuáles son los elementos guías útiles para indicar yacimientos minerales de componentes diferentes (*Tabla 10*).

En el caso de la búsqueda de menas, a veces el geólogo analiza las muestras con respecto a un elemento guía ("pathfinder"), y no, con respecto al elemento principal; porque el elemento guía tiene dispersión más amplia o quizás puede analizarse más fácilmente, por ejemplo: el Mo se emplea como elemento guía en la búsqueda de pórfidos de Cu, el As en la búsqueda de vetas auríferas, etc. (Siequel, 1992)

Elementos indicadores "pathfinders" de distintos tipos de yacimientos minerales			
Tipo de depósito	Elementos mayores	Elementos asociados	Elementos indicadores analizados por métodos comunes
Pórfido de Cu	Cu	Mo, Au, Ag, Re, As, Pb, Zn, K.	Cu, Mo, Zn, W, Sb
Pórfido de Mo	Mo	W, Sn, F, Cu	Cu, Mo, Sn, W
Skarn-magnetita	Fe	Cu, Co	Fe, Cu, Co
Skarn Cu	Cu, Fe	Au, Ag	Cu, Fe, Ag
Skarn Pb-Zn	Pb, Zn	Cu, Co	Pb, Zn, Cu, Co
Skarn W-Mo-Sn	W, Mo, Sn	F, Cu, Be, Bi	W, Mo, Sn, Cu, Be, Bi
Vetas de metales base y VMS	Pb, Zn, Cu	Ag, Au, As, Sb, Mn, Ba	Pb, Zn, Cu, Ag, Sb, Ba
Sn-W en greisenes de cuarzo	Sn, W	Cu, Mo, Bi, Li, Rb, Cs, Re, B, F	Sn, W, Mo, Cu, Bi
Veta sulfuro de Sn	Sn	Cu, Pb, Zn, Ag, Sb	Sn, Cu, Pb, Zn, Ag, Sb
Veta de Co-Ni-Ag	Co, Ni, Ag	As, Sb, Bi, U	Co, Ni, Ag, Sb, Bi
Mena de Au	Au, Ag	As, Hg, Sb, Te, Se, U	Ag, Sb
Hg y Sb-Hg	Hg, Sb	As, Ba	Sb, Ba
Veta de U	U	Mo, Pb, F, Zn, Ag, Cu	Mo, Pb, Zn, Ag, Cu
Cu en basalto	Cu	Ag, As	Cu, Ag

**Tabla 10.** Elementos indicadores de los distintos tipos de yacimientos minerales (Compilación de Boyle, 1974, Beus y Grigorian, 1977 y Rose, 1979).

En el caso de los sulfuros, la movilidad de los metales de mena en un medio hidrotermal de transporte, suelen seguir un orden decreciente: Hg > Pb > Zn > Cu > Sn > Ni > Fe > Co. En el caso de estudiar las secuencias zonales relacionadas con la mineralización de sulfuros, se puede interpretar que el Hg estará más alejado de la fuente principal de mineralización, siendo este comportamiento el guía para utilizarlo en la búsqueda de yacimientos de sulfuros. **Ovchinnikov y Grigoryamn** compilaron datos de la dispersión geoquímica primaria en tres dimensiones (testigos de perforación), en yacimientos hidrotermales de sulfuros de las clases teletermales plutogénicos y del grupo skarn de menas sobreimpuestas. Ellos informaron que esta dispersión tiene dos características que permiten aplicarla en la exploración geoquímica:

- La dimensión de la dispersión geoquímica primaria de varios elementos es mucho más amplia que la dispersión generada en los alrededores del yacimiento.
- La extensión vertical de la dispersión primaria es especialmente grande sobre los cuerpos de mena con pendiente pronunciada.

<b>La zonación lateral y vertical de dispersiones endógenas de distintos tipos de yacimientos</b>		
<b>Yacimientos</b>	<b>Zonación lateral</b>	<b>Zonación vertical</b>
Pb-Zn en skarn	Ba, Zn, Pb, As, Ag, Cu, Sb	Sb, Cu, As, Ba, Ag, Pb, Zn, Cu
Pb-Zn en rocas efusivas ácidas	Pb, Ba, Zn, Ag, Cu, As, Co	As, Ba, Ag, Pb, Zn, Cu, Co
Skarn-Scheelita	W, Mo, Cu, Ba, Zn, Pb	Ba, Pb, Zn, Cu, W, Mo
Skarn Cu	Cu, Fe	Au, Ag
Au-cuarzo	Au, As, Bi, Ag, Pb, Sb, Cu, Be, Mo, Co, Zn	Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Mo, Au, Co, Be
Cu-Au	Au, Cu, Mo, Ag, As, Sb	Sb, As, Ag, Cu, Mo, Au
Cu-Bi	Cu, Bi, Pb, Ag, As, Ba, Zn, Co	Ba, Ag, Pb, Zn, Cu, Bi, Co
U-Mo	U, Mo, Pb, Cu, Zn, Ag	Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, U
Hg	Hg, As, Ba, Cu, Pb, Zn, Ni, Ag, Co	Ba, Hg, Sb, As, Ag, Pb, Zn, Cu, Ni, Co
Sulfuros-casiterita	Ag, Zn, Pb, Sn, Cu, Mo	Ag, Pb, Zn, Cu, Mo, Sn
Pb-Zn (estratiforme)	Ag, Pb, Cu, As, Ba, Co, Zn, Ni	As, Ba, Ag, Cu, Pb, Zn, Co.

**Tabla 11.** Zonación lateral y vertical, elementos en orden decreciente de la extensión de sus dispersiones; desde la izquierda a la derecha, los indicadores gradúan abajo hacia los indicadores de la sub-mena. (Siegel, 1992)

## 5.6. Límites aproximados de detección en ppm

En la siguiente tabla se puede apreciar los límites de detección de 73 elementos.

Element	AAS	ICPAES <sup>2</sup>	ICPMS	XRF	Comments <sup>3</sup>
Ag	1	1 (0.1)	0.1		0.1 by solv. ext. AAS
Al	100	10	10		Fusion recommended
As	20	1 (0.2)	1	5	1 by hydride gen. AAS
Au	0.001	0.01	0.001		0.1 ppb by Zeeman-GF AAS, 0.05 ppb Au by cyanide leach
B		10	10		
Ba	20	5	1	10	
Be	0.1	0.1	0.02		
Bi	5	5 (0.2)	0.2	5	
Br				5	
Ca	10	10			
Cd	1	1 (0.1)	0.1	10	
Ce		20	0.1	20	
Co	2	5	0.1		
Cr	5	5	1		
Cs		10	0.2	10	
Cu	2	2 (1)	1	5	
Dy		10	0.1		
Er		10	0.1		
Eu		1	0.1		
F					10 by fusion + SIE
Fe	10	10	10		
Ga		10	0.2		
Gd		10	0.1		
Ge		20	1		
Hf		10	0.5		
Hg	0.05 (cold vap.)	(0.5)	0.1	4	
Ho		20	0.1		
I					10 by colorimetry
In	10	20	0.1	10	
Ir					0.001 by NiS fire assay
K	10	10			
La		5	0.1	20	
Li		5	0.2		
Lu		10	0.1		
Mg	10	10	10		
Mn	5	5	1		
Mo	2	2 (0.2)	0.2	4	
Na	10	10	10		
Nb		10	0.2	2	
Nd	300	10	0.1		
Ni	2	5	1		
Os					0.001 by NiS fire assay
P		10	1		
Pb	5	5 (1)	1	5	
Pd	0.01	0.01	0.001		
Pr		10	0.1		
Pt	0.01	0.01	0.001		
Rb		10	0.2	10	
Re			0.1		
Rh					0.001 by NiS fire assay
Ru					0.001 by NiS fire assay
S		10			100 by LECO
Sb	5	5 (0.2)	0.2	4	
Sc		1	1		
Se		(0.5)	0.5	2	
Si		100			Fusion necessary
Sm		10	0.1		
Sn		10	0.2	5	
Sr		5	1	5	
Ta		10	0.2	10	
Tb		10	0.1		
Te		(0.5)	0.2	10	
Th		20	0.1	4	
Ti		10	10	10	
Tl		(0.5)	0.1		
Tm	5	10	0.1		
U		20	0.1	4	
V	10	5	1		
W		5	0.2	10	
Y		5	0.1		
Yb		10	0.1		
Zn	1	2 (1)	1	5	
Zr		10	1	10	

**Tabla 12.** Límites de detección en ppm para los diferentes métodos analíticos. (ALS Chemex)

### 5.7. Muestreo geoquímico

El muestreo geoquímico es la acción de recoger muestras representativas o selección de una porción dada de material que representará las características de un conjunto, cuyo objetivo es reducir su volumen, pero garantizando mantener sus características globales, físicas, químicas o mineralógicas. Estos datos geoquímicos se usan conjuntamente con otros indicadores y/o disciplinas usadas en áreas potenciales de yacimientos económicos de mena, como magnetismo, gravedad, conductividad y resistividad, polarización inducida, etc. (Acosta, 2011).

Las prácticas y los procedimientos usados en cada programa de muestreo deben ser los apropiados para los objetivos del programa. Todos los programas de muestreo deben ser llevados a cabo de manera cuidadosa y diligente, usando prácticas de muestreo científicamente establecidas, diseñadas y probadas para asegurar que los resultados sean representativos y confiables. Las muestras deben ser recolectadas bajo la supervisión de la **Persona Calificada**. Debe planearse e implementarse programas de control de calidad apropiados al tipo de muestra y de mineralización. (Lugo, 2010)

Los métodos de muestreos más comunes son los que se aplican a las rocas, sedimentos y suelos. Por tal motivo, nuestro principal énfasis en este trabajo está dedicado a los tres principales muestreos señalados, atendiendo al hecho que tienen la incidencia directa en la labor cotidiana de los geólogos exploradores.

TIPO DE MUESTRA	REGIONAL > 5000 km <sup>2</sup>	DISTRITAL 50 - 5000 km <sup>2</sup>	ÁREA 5 - 50 Km <sup>2</sup>	MINERALIZACIÓN < 5 Km <sup>2</sup>
Roca	X	X	XX	XX
Suelo	X	X	XX	XX
Sedimentos	XX	XX	X	
Sedimentos de lago	XX	XX	X	
Aguas subterráneas	XX	XX	X	
Depósitos glaciares	XX	XX	XX	X
Biogeoquímica		X	XX	X
Geobotánica	X	X	X	
Gas			X	X

**Tabla 13.** *Uso de los tipos de muestras geoquímicas en las diferentes etapas de la exploración (Coope et al, 1993). X, utilizados ocasionalmente en ambientes adecuados; XX, utilizados en ambientes adecuados.*

Los pasos a seguir para la toma de muestras geológicas son:

- Seleccione equipos y herramientas de muestreo de acuerdo a las condiciones del terreno y técnicas de muestreo a emplearse.
- Prepara el lugar del muestreo de acuerdo a los procedimientos establecidos para programas de exploración.
- Extrae una muestra representativa aplicando técnicas de muestreo, respetando normas de seguridad, evitando la contaminación de la muestra, y cumpliendo las normas medioambientales.
- Envasa las muestras de acuerdo al tipo de material constituyente, evitando pérdida y contaminación de la misma.
- Rotula y registra en terreno las muestras, respetando la numeración y características específicas de ellas.
- Dibuja en un plano la localización del punto de muestreo.

#### **5.7.1. Muestreo geoquímico de sedimentos de quebradas**

Muy a menudo suele ocurrir que la roca madre no aflore extensamente para permitir un muestreo adecuado, encontrándose ésta cubierta por un suelo de espesor variable. En este caso el sedimento de quebrada se utiliza como un muestreo de reconocimiento representativo de los productos de meteorización de rocas provenientes de las zonas circundantes de cotas y/o niveles superiores. En las exploraciones regionales, la densidad de muestreo varía, según las condiciones geológicas, topográficas y geomorfológicas del área.

Las muestras de sedimentos de drenaje deben ser tomadas de manera que incluyan fracciones de arena, limo y arcillas en un peso de 4 a 5 Kg de muestra, a una malla N° 30 para luego ser tamizadas en el laboratorio a malla N° 80 ó 200, en función al elemento y ocurrencia buscada.



Para ello se debe realizar un correcto muestreo con las herramientas y materiales adecuados (Fig. 48), para así obtener una muestra representativa, proporcional y no contaminada. (Vargas, 2010).



**Figura 48.** A) *Equipo de campo de geólogo, se observan picotas, brújula, GPS, radio comunicador;* B) *Materiales a utilizar para la prospección geoquímica: guantes, tamices, lavatorios, floculante y paleta.* (Tomado de “Prospección geoquímica, Vargas, 2010).

El sistema de muestreo geoquímico de sedimentos fue desarrollado por la **British Geological Survey**, el cual ha sido cuidadosamente adaptado y mejorado. A continuación se resume dicha metodología:

- Cada campaña de muestreo comienza con un programa de inducción para asegurar la estandarización de los criterios y aplicación de los procedimientos de muestreo.
- Ubicarse en el punto de muestreo y tomar las coordenadas.
- Graficar la ubicación de la muestra en el mapa de campo.
- Anotar las coordenadas y la información de la ubicación de la muestra.
- Seleccionar en el cauce las zonas de menor energía (Fig. 49). Los sedimentos no deben evidenciar contaminación aluvial, coluvial, eólico o antrópica de una u otra margen.



**Figura 49.** Zona de menor energía propicia a extraer una muestra de sedimentos, obsérvese el material de arenas y limos a obtener. Quebrada Azulccasa, región de Apurímac. (Tomado de “Prospección geoquímica, Vargas, 2010).

- En ningún caso la muestra debe tomarse en un sólo lugar, la separación entre muestras puede ser de un distanciamiento de 30 m. (*Fig. 50*).
- Limpiar el equipo de muestreo antes de proceder a la toma de la muestra.
- El operador no debe vestir elementos que puedan contaminar la muestra, así como anillos o relojes.
- Al tomar la muestra de sedimento se recomienda profundizar unos 20 cm. a más y realizar un pequeño canal de muestreo, tal como se observa en *la figura 49*
- Previamente al tamizado se debe retirar (a mano) los clastos gruesos.
- Durante el tamizado se recomienda emplear cantidades mínimas de agua, lo suficiente como para facilitar el paso de los sedimentos, en todo momento se debe

evitar que se introduzca material grueso al recipiente que se encuentra debajo del tamiz



**Figura 50.** Puntos recomendados a lo largo de la quebrada para la extracción de muestra de sedimentos.

- El tamizado termina cuando se obtenga entre 4 a 5 Kg. de sedimento, para luego aplicar la solución floculante, y dejar que los sedimentos finos decanten.
- El sedimento es colocado en una bolsa especial microporosa o polietileno, para el caso de muestras húmedas o secas, respectivamente.
- Al finalizar el muestreo, todo el equipo debe ser lavado antes de ser embalado y transportado.
- Las muestras de control “duplicado” se deben recolectar de la misma forma que las originales (en los mismos puntos y proporción).





**Figura 51.** A) Toma de la muestra de sedimento en la zona de menor energía; B) Tamizado de los sedimentos; C) Sedimentos finos obtenidos después del tamizado; D) Ordenamiento por códigos de las muestras obtenidas en el muestreo para su posterior empaquetamiento. (Vargas, 2010).

### 5.7.2. Muestreo geoquímico de suelos

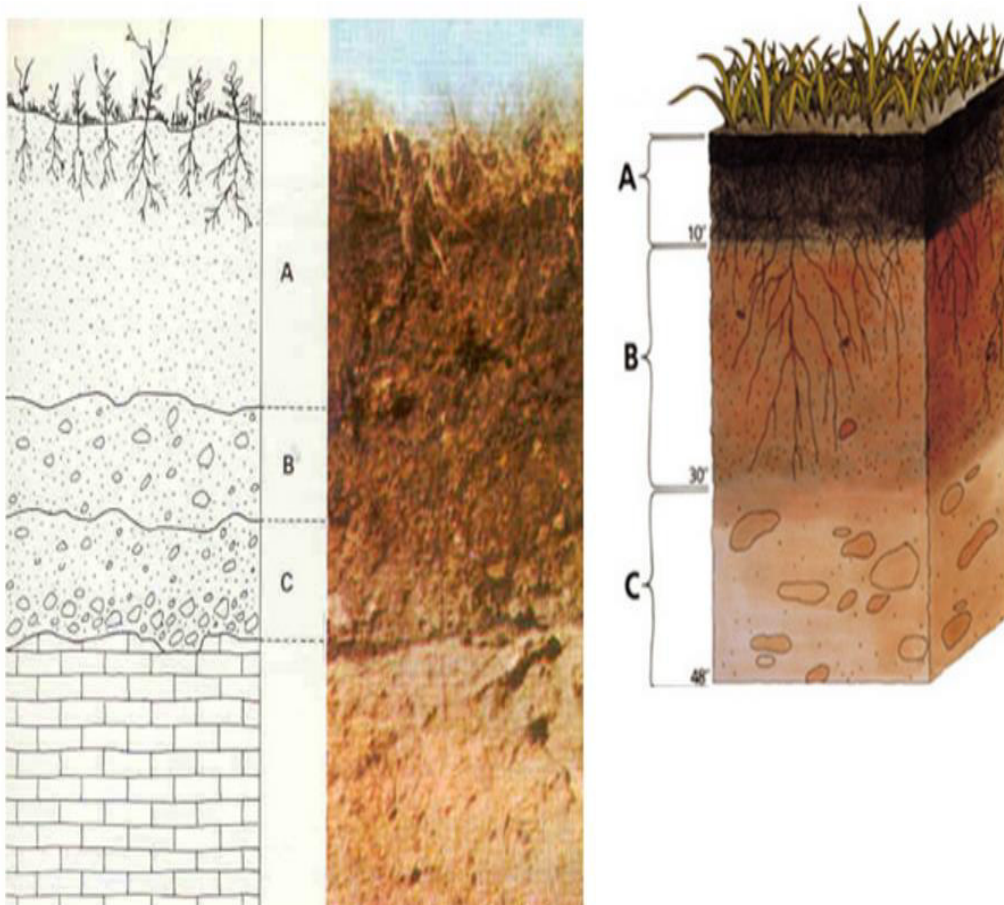
El suelo residual constituye la muestra más importante para ubicar potencial mineralización debajo de la superficie terrestre (a diferencia de los suelos transportados); pues, éste es la porción representativa del material no consolidado que compone la capa superior de la corteza terrestre, compuesta por: partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos. Asimismo es resultante de la meteorización de las rocas, formado por procesos físicos y químicos en los que hay disolución del substrato, incorporación de materia orgánica y formación de complejos órgano-minerales. (Ortiz, S.F.)

El espaciamiento de la red que se usa en los estudios geoquímicos para el muestreo de suelos es muy variable, y depende del tamaño del “target”, su orientación, las tendencias estructurales geológicas, y la movilidad de los elementos químicos del proyecto. La selección de un elemento o de más de uno, depende de la supuesta

génesis del yacimiento que se busca, de las condiciones de temperatura, presión y concentración elemental que rigieron durante su deposición.

Para la toma de las muestras deberá seleccionarse con cuidado la fracción que se aplicará en el estudio, así como el horizonte que se usará en el trabajo geoquímico. Preferiblemente se extraerá el horizonte B, porque contiene la máxima acumulación de los minerales de arcilla y óxidos de hierro y manganeso; componentes sólidos que tienden a absorber los metales usados con frecuencia en la prospección.

El muestreo consiste en realizar una calicata cuadrangular de 50 x 50 cm aproximadamente, cuya profundidad será variable (no pasando de un metro). Encontrado el horizonte deseado, se muestreará 2 kg de suelo (recomendando tamizarlo), para ser colocado en una bolsa plástica; no obstante, el geólogo describirá las características del suelo (color, granulometría, rodados), y tomará una foto.



**Figura 52.** Perfil general de suelos (Levinson, 1974).





**Figura 53.** A) Calicata de 1 m. de profundidad, fotografía tomada para la base de datos; B) Extracción de la muestra de suelo en un balde plástico para ser tamizada.

### 5.7.3. Muestreo geoquímico de rocas

El muestreo geoquímico de rocas, es una herramienta que ayuda a determinar y localizar un depósito mineral. Evaluar su ley, estimar su volumen e interpretar su génesis.

El muestreo de rocas es la más variada de las técnicas que el geólogo de exploración ejecuta durante las fases de reconocimiento geológico, prospección, exploración, y vida útil de la mina. El principal objetivo del explorador es lograr el acceso y reconocimiento de las rocas contenedoras de la mineralización (usualmente denominadas roca caja, roca encajonante o roca huésped).

El geólogo tratará de alcanzar los sitios donde afloren unidades de roca, teniendo como finalidad la descripción y muestreo de éstas; ello quiere decir que, desde las primeras investigaciones, en sitios de baja densidad de afloramientos, se avanzarán labores complementarias tales como: piques o calicatas, trincheras, pozos verticales, galerías de exploración y, especialmente, pozos de perforación. Cada una de estas variantes de afloramientos, obligarán a la utilización de los métodos de muestreo, tales



como el muestreo en canal, muestreo de esquirlas, muestreo en panel y muestreo selectivo.



**Figura 54.** A y B) Muestreo geoquímico de roca por trabajadores capacitados, obsérvese los equipos de protección personal utilizados.

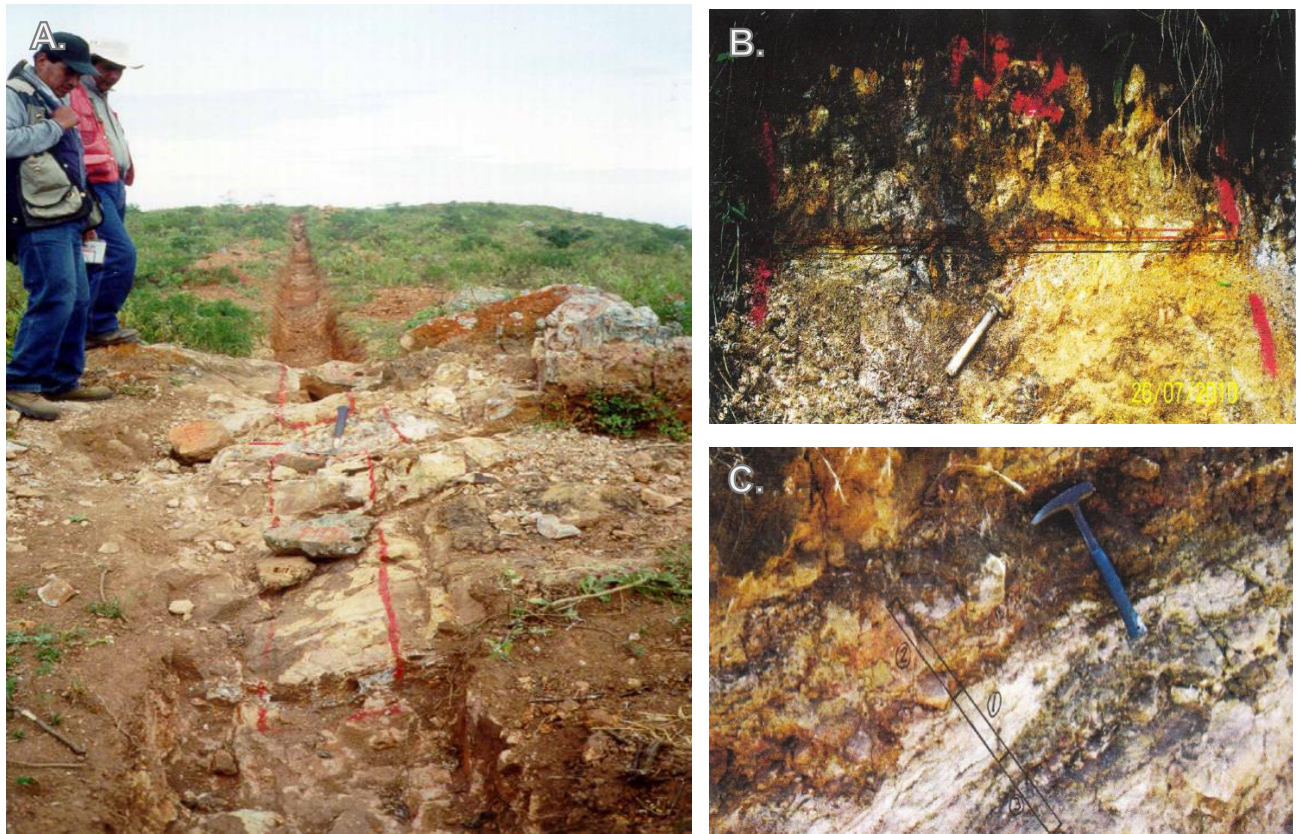
Los más frecuentes tipos de muestreos son:

➤ ***Muestreo geoquímico en canal***

Este tipo de muestreo se emplea con más frecuencia en la fase de prospección, el cual consiste en realizar un corte uniforme y continuo, perpendicular a la estratificación y/o cuerpos tabulares mineralizados.

El método consiste en delimitar un canal con líneas paralelas que unen el techo y el piso del cuerpo tabular, luego se limpiarán el área superficial del canal retirando la parte superficial hasta encontrar la roca-mineral sin contaminación, con el uso de la comba y cincel se rompe la roca de manera continua formando el canal, cuya profundidad varía hasta unos pocos centímetros (*Fig. 55*). (Lugo, 2010).

El material será recogido en bolsas especiales de muestreo, para finalmente empaquetarse y rotularse de acuerdo a las normas establecidas.



**Figura 55.** A) Muestra en trinchera, la cual se le realizó canales de muestreo; B) Muestra en canal de alteraciones hidrotermales; C) Muestra en canal de veta de cuarzo con roca caja. (Tomado de Lugo, 2010).

#### ➤ **Muestreo geoquímico de esquirlas de roca (chip)**

Es la técnica de muestreo más práctica, rápida y utilizada por los geólogos de campo; lo aplicaremos en afloramientos superficiales de roca-mineral en depósitos de cuerpos masivos o diseminados.

El procedimiento consiste en delimitar la superficie y/o pared de roca-mineral a ser muestreada y en ella “idealmente” plantear una red simétrica; lo primero es limpiar el área superficial de la roca-mineral de manera puntual en los sitios definidos de la red, arrancando fragmentos de 2-4cm de diámetro. (Lugo, 2010).

El peso de la muestra puede ser hasta los 3 Kg.

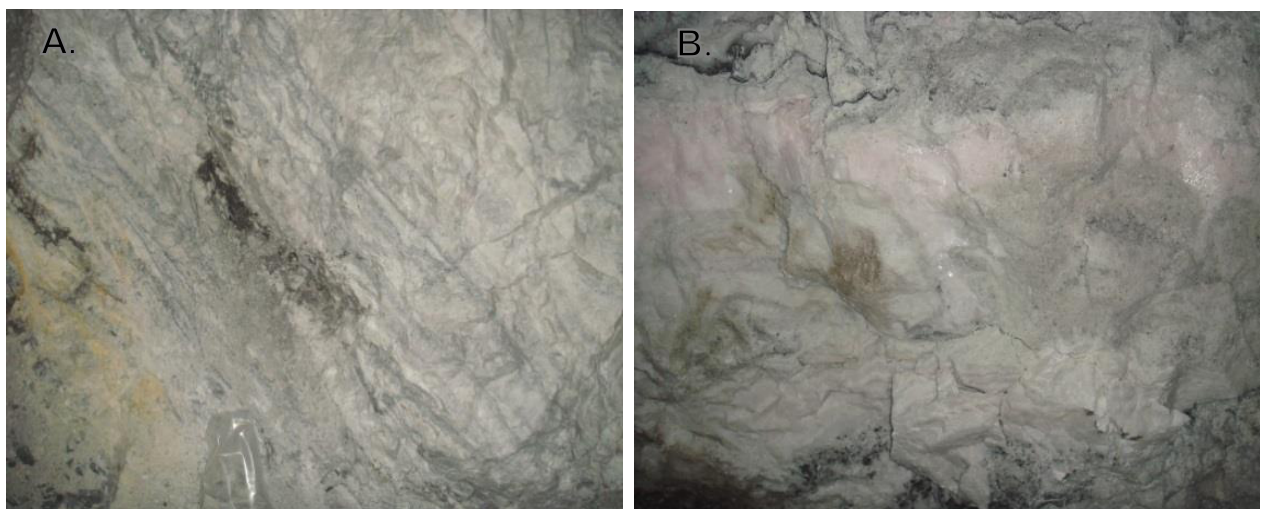




**Figura 56.** Muestreo por esquirlas de roca o chip, se aprecia la red planteada. (Lugo, 2010).

#### ➤ **Muestreo geoquímico selectivo**

El muestreo selectivo generalmente lo utilizamos para obtener una muestra específica y representativa de lo que se desea estudiar, por ejemplo, se colecta únicamente la rodocrosita de una veta de cuarzo de baja sulfuración, con el objetivo realizar un estudio de isótopos de plomo. También se suele utilizar para muestras especiales de isótopos de plomo, geocronología, inclusiones fluidas y secciones delgadas.



**Figura 57.** Muestreo selectivo de rodocrosita de una veta de cuarzo-rodocrosita-pirita (Veta Ángela, Mina Inmaculada).

Por otro lado, cada muestra de roca colectada para el análisis químico será descrita por el geólogo en las tarjetas de muestreo, aquella donde se identificarán características litológicas, mineralógicas y estructurales (Fig. 58); no obstante, estas tarjetas quedarán almacenadas en la base de datos.

El formulario, titulado "ROCAS / SUELOS", pertenece a "PERÚ MINERALS S.A.C." y lleva el número "500719". Se divide en varias secciones:

- Encabezado:** Campos para Proyecto, Geólogo, Fecha, Opts, Hoja, Datum, Zona y Ubicación.
- Coordenadas:** Sección para Cota, Coordenadas UTM (E, N) y Coordenadas GEO (S, Lat, W, Long).
- ESTRATIGRAFIA:** Campos para Sistema y Formación.
- Litología:** Campos para Nombre, Color, OXIDOS (Cu, O<sub>2</sub>) y %.
- SUB TIPO:** Opciones de Alteración (Alcalina, Sulfatada, Oxidada, Reducida) y Morfología (Coral, Chips, Canchales, Otros).
- ESTRUCTURAS:** Campos para Tipo, Modif, Rumbos, Buzas y # Estructuras / m<sup>2</sup>.
- LI-MONITAS:** Campos para Nombre (Hematita, Jarosita, Goethita) y %.
- MINERALIZACION:** Campos para Nombre (Pirita, Calcopirita) y %.
- ALTERACION:** Campos para Nombre (Potásica, Fílica, Sílica, Argílica, Propílica) e Intensidad.
- Observaciones:** Espacio libre para notas adicionales.

**Figura 58.** Tarjeta de muestreo para rocas y suelos (obtenido de Perú Minerals S.A.C.)

#### 5.7.4. Muestras de control o QA-QC:

Los resultados químicos y geoquímicos de cualquier tipo de muestra no tendrán validez ni serán altamente confiables, si es que no se someten a un riguroso control de calidad (QA - QC). Este control nos ayudará a reducir e identificar los errores almacenados en nuestra base de datos, monitoreando tanto el muestreo rutinario y el trabajo que realizan los laboratorios y así minimizar el posible error en la secuencia muestreo-cuarteo-preparación-análisis; para ello se realizará la inserción sistemática de muestras de control en los lotes enviados al laboratorio primario (aquel utilizado para envío regular de muestras). A continuación se describen los errores más comunes (Aronés, 2010):

##### ➤ **Heterogeneidad geológica**

Se destacan los errores de codificación de los datos, el uso de programas inadecuados de estimación, la utilización de personal poco calificado al momento de tomar la muestra, etc.

➤ ***Toma de muestras***

Entre los principales errores se tiene el muestreo predominante del material más blando, frágil o de fragmentos grandes de material duro, la orientación incorrecta de la línea de corte en el muestreo de testigos; ignorar los contactos litológicos, confusiones en el etiquetado, orden de las muestras, etc.

➤ ***Base de datos***

Algunos de los errores vinculados a la preparación de la base de datos ocurren durante la propia introducción de la información. Comúnmente la digitación repetida de los datos, el uso de fórmulas en la numeración o codificación errónea de las muestras de control de calidad.

➤ ***Contaminación***

Esto se puede dar por la transferencia involuntaria de material de una muestra o del medio circundante. Al preparar o analizar algunas muestras, es posible que cierta porción de una muestra o de solución quede retenida accidentalmente en el equipo, y contamine las muestras cercanas.

Los errores anteriormente descritos, van a traer resultados analíticos no deseados, y con ello traer confusión en el análisis de la información; por esa razón, es necesario colocar las respectivas muestras de control en cada paquete de envío al laboratorio.

Por lo general se utilizan tres tipos de muestras de control, las cuales se describen a continuación:

➤ ***Muestra de referencia estándar (STD)***

Son aquellas muestras que son elaboradas en condiciones especiales por los laboratorios de referencia, utilizadas para evaluar la exactitud analítica al insertar los estándares en el control interno. Lo recomendable para la elección de este tipo de muestras es que el material sea similar al depósito o yacimiento a evaluar; estos deberán ser certificados y las empresas proveedoras deben estar debidamente acreditadas.

➤ ***Muestras duplicadas (DUP)***

Estas muestras se obtienen realizando un re muestreo muy similar al ejecutado inicialmente del mismo punto o área de muestreo, cuya finalidad es generar información suficiente para obtener estimaciones de la varianza y determinar su precisión. Al recibir los resultados geoquímicos se realizará la comparación de valores geoquímicos de la muestra original con la duplicada y así detectar algún posible error.

➤ ***Muestras blancas (BLK)***

Son muestras de control, muestras de referencia de cuarzo blanco estas carecen de valor económico, pudiendo ser finos o gruesos, por consiguiente, estas muestras de control previenen o ayudan a localizar una posible contaminación en la preparación de las muestras en el laboratorio, las muestras blancas se insertan en el grupo de muestras a analizar.

## **5.8 Correlaciones geoquímicas**

Indica el grado de relación y significación entre series de datos o variables, existen muchas variables, en especial cuantitativas que dependen en algún grado de otras; entonces es posible que una variable pueda estar correlacionada matemáticamente en función de la otra. La correlación estadística más utilizada por los geólogos es la denominada Correlación de Pearson, aquella usada en los diagramas multivariados; haciendo posible la asociación de todos los elementos, describiendo la intensidad de la relación lineal entre dos conjuntos de variables a nivel de intervalo. El valor del coeficiente de correlación puede tomar valores desde menos uno hasta uno, indicando que mientras más cercano a uno sea el valor del coeficiente de correlación, en cualquier dirección, más fuerte será la asociación lineal entre las dos variables. (Siegel, 1992). Cabe resaltar que el análisis de correlación solo es una guía y no prueba relación directa entre las variables. No obstante, si las correlaciones son lógicas con respecto a los procesos y las relaciones geológicas - geoquímicas, se puede resumir una relación casual.

## **5.9. Análisis multivariado de componentes principales**

Muchos estudios geoquímicos se evalúan en primer término con una sola variable por vez, y luego se combinan los resultados de cada una, ello incluye técnicas



multivariantes. Éstas se basan en la relación entre las concentraciones de varios elementos, y otras mediciones que puedan hacerse con las muestras. Para estudiar las relaciones que se presentan entre  $p$  variables correlacionadas (que miden información común) se puede transformar el conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables correlacionadas entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información), llamado conjunto de componentes principales. (Sieguel, 1992). Las nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores, y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra. Si las variables originales no están correlacionadas desde el inicio, entonces no tendrá sentido realizar un análisis de componentes principales, pues el análisis de componentes principales es una técnica matemática que no requiere la suposición de normalidad multivariante de los datos.

#### **5.10. Comportamiento estadístico y anomalías geoquímicas**

La estadística básica determina el valor de fondo (“background”), las limitaciones de fluctuación local y regional (“thresholds”), y el valor por encima del cual, una concentración geoquímica puede considerarse anómala (anomalía). (Sieguel, 1992)

##### **5.10.1. Valor de Fondo o “Background”**

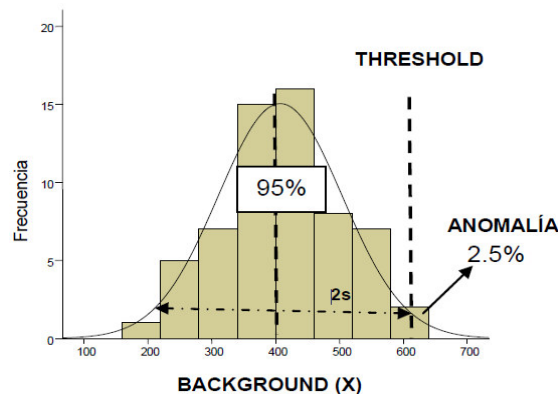
Su determinación se realiza por evaluaciones estadísticas, y comparaciones con los valores referenciales calculados para diferentes tipos de materiales naturales en la Tierra. Este contenido es sometido a variaciones de acuerdo al tipo de roca u otro material en el que ocurre el elemento, por ello se considera como un valor medio (medidas de tendencia central, media aritmética, media geométrica), y no como un valor ponderado. En la investigación y prospección de proyectos de mineros, los elementos traza se deberán calcular por medio de la media geométrica, pues este parámetro reprime los valores altos o bajos erráticos, permitiendo una menor desviación estándar. (Rivera, 2010)

##### **5.10.2. Umbral geoquímico o Threshold**

Estadísticamente es el límite superior de las fluctuaciones del “background” y está en función de la concentración normal más dos veces la cantidad por la que se desvían los valores de fondo (Rivera, 2010). El valor de umbral coincide con el límite superior de

los valores del fondo, puesto que los valores mayores serían anomalías y estaría representado por la siguiente fórmula:

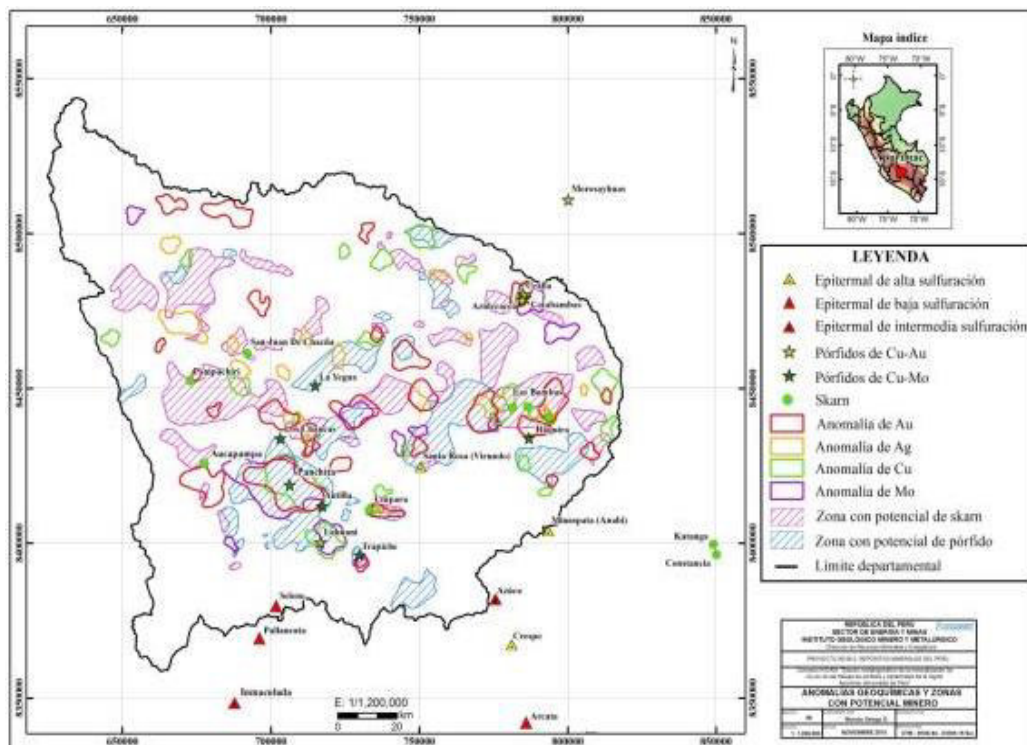
$$Th = X + 2S \text{ (Desviación estándar)}$$



**Figura 59.** Parámetros geoquímicos de una distribución, representado en un histograma de barras. El 95.0% caen entre el valor medio más/menos dos veces la desviación estándar, por lo tanto el 2.5% aproximado que excede a este límite superior es considerado como un valor anómalo. (F. Rivera, 2007).

### 5.10.3. Anomalías geoquímicas

La anomalía geoquímica es una desviación con respecto a lo normal, es decir, que el mayor contenido de un elemento se comparará con las zonas circundantes. Estadísticamente, la anomalía relaciona los parámetros estadísticos de posición con los parámetros de dispersión. A partir de esta relación, se diferencian los fondos en términos de un valor numérico de un elemento químico, de los valores anómalos.



**Figura 60.** Plano de anomalías geoquímicas (Au, Ag, Cu y Mo) de sedimentos de quebrada.

## **VI. PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

La prospección geofísica es un conjunto de técnicas físicas y matemáticas aplicadas a la exploración del subsuelo para la búsqueda de yacimientos minerales. En la actualidad la geofísica juega un papel cada vez más importante en las investigaciones geológicas, ya que una buena interpretación dependerá mucho del método que el geólogo aplicará para obtener los resultados deseados y continuar con la perforación del subsuelo. Para la ejecución de los métodos geofísicos, se requerirá de un geofísico especialista encargado de realizar los procedimientos. Entre los métodos más importantes están: la resistividad eléctrica, radiometría y susceptibilidad magnética.

### **6.1. Magnetometría**

La prospección magnética es una técnica basada en la medida y estudio de las variaciones del campo magnético terrestre, obteniéndose medidas del valor total del campo magnético o bien, opcionalmente, del gradiente de dicho campo magnético. Estas variaciones, son debidas a la presencia de cuerpos susceptibles de ser magnetizados y que, por tal motivo, contribuyen a modificar el campo magnético terrestre en su entorno (Tabasco, S.F.). Aquellos yacimientos que presenten minerales magnéticos reflejarán anomalía geofísica ya que producen un campo magnético inducido.

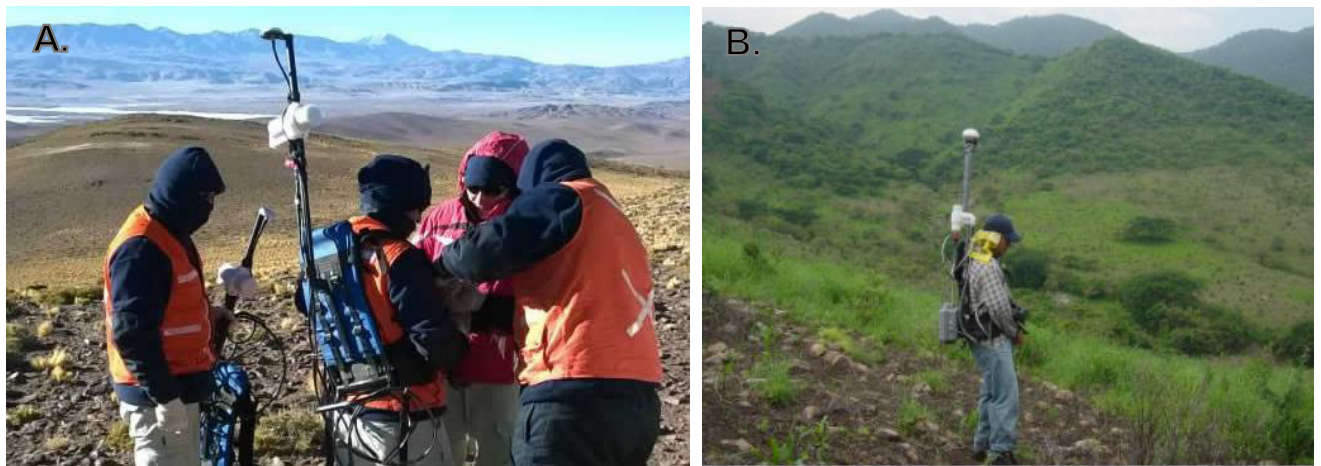
Aplicando el método magnético en la prospección minera se quiere delinear variaciones del campo geomagnético, es decir, anomalías magnéticas relacionadas con un depósito mineral con un cierto contenido en magnetita, pirrotina o sulfuros. Generalmente las mediciones magnéticas se realizan a lo largo de perfiles; pues ello consiste en caminar con el magnetómetro por la línea geofísica señalada y combinarlas para obtener un mapa de observaciones magnéticas (Dávila 2015).

La mayoría de los magnetómetros disponibles para la prospección minera (*Fig. 61*) mide variaciones de la intensidad vertical (interpretación más clara en comparación a la medición de variaciones en las intensidades total y horizontal).

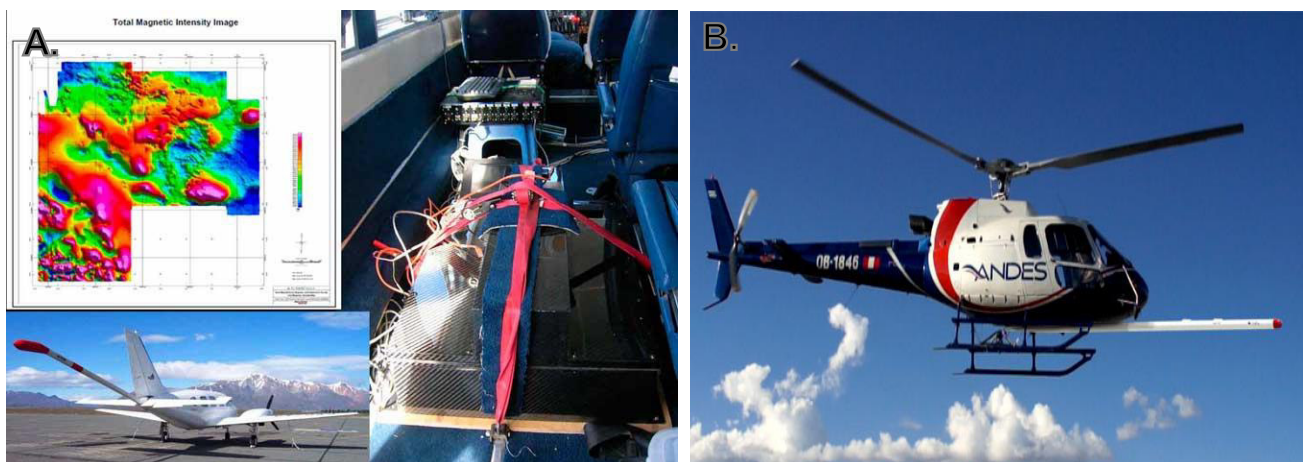
El campo geomagnético sufre variaciones con respecto al tiempo y a su forma como la variación diurna. Estas variaciones, que no están relacionadas con un depósito mineral, pero poseen cierto contenido de magnetita, superponen los valores medidos, por lo que

se deben corregir. La variación diurna se corrige repitiendo la medición de la variación de la intensidad vertical en una estación de base en intervalos de tiempo regulares desde el principio hasta el fin de la campaña de medición. Los valores medidos en la estación de base se presentan en función del tiempo, que permite calcular el valor de corrección correspondiente a cada medición, presentando en perfiles y/o mapas los valores reducidos. (García, 2013).

Por otra parte, se puede utilizar magnetometría aérea para extensas áreas o zonas con topografía accidentada. EL instrumento medidor o magnetómetro podrá ser llevado en avión o helicóptero (*Fig. 62*).



**Figura 61.** A) Preparación del magnetómetro portátil para iniciar la toma de datos; B) Proceso de medición de las líneas geofísicas.



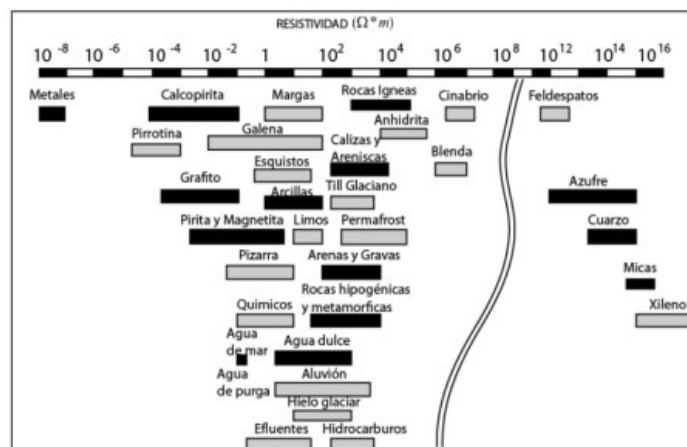
**Figura 62.** A) Magnetómetro aéreo y plano resultante de la toma de datos; B) Helicóptero realizando la toma de datos.

## 6.2. El método de polarización inducida

El método de Polarización Inducida es un método geofísico, el cual es ampliamente usado en la exploración de yacimientos metálicos, ya que es capaz de identificar concentraciones anómalas de sulfuros en profundidad. La popularidad del método radica en el descubrimiento de depósitos (con metales base) a gran y pequeña escala las que han sido realizadas con la ayuda del método (*Watts, 2002*). Algunos estudios de campo establecen que las anomalías de IP y resistividad, por lo general, ocurren juntas (alto IP en sectores con baja resistividad), por lo que se podría argumentar que el uso del método no está justificado. No obstante, existen numerosos casos de éxito en la aplicación del método IP, en zonas con presencia de mineralización diseminada (p.ej. pórfidos Cupríferos), donde las anomalías de resistividad son prácticamente inexistentes (*Telford et al., 1990*). A continuación se describen las dos propiedades eléctricas del subsuelo que el método IP permite caracterizar: la resistividad eléctrica y efecto de polarización inducida.

### 6.2.1. Resistividad

Este método se basa en el hecho de que los suelos, dependiendo de su naturaleza, presentan una mayor o menor resistividad eléctrica cuando una corriente es inducida a través de ellos. (*García, 2013*). La resistividad eléctrica de un volumen de roca depende de las características de cada mineral, de su porosidad, la composición de los fluidos presentes en ella, su grado de saturación, entre otros (*Aguilef, 2012*). Por lo general, los minerales formadores de roca se consideran como aislantes efectivos, y por tanto no conducirían corriente. No obstante, variables como las antes mencionadas podrían modificar ésta situación (*Telford et al, 1990*).



**Figura 63.** Diagrama de resistividad para distintos tipos de roca y minerales (modificado de Orellana, 1982).

Se distinguen 4 tipos de conductores: (a) metales y (b) semiconductores, cuya conductividad es electrónica; (c) dieléctricos, y (d) electrolitos, con conductividad iónica. Los tipos de conductores y sus minerales asociados más comunes son (*García, 2013*):

- **Metales (*Au, Ag, Cu, Sn, grafito*):** Presentan resistividades muy bajas, del orden de  $10^{-8}$ - $10^{-7}$  [ $\Omega \cdot m$ ]. Los electrones tienen gran movilidad producto del enlace metálico. A escala macroscópica, la conductividad no es tan significativa, debido a la presencia de impurezas que en general se encuentran en una mayor proporción.
- **Semiconductores (*calcopirita, bornita, pirita, magnetita, pirrotina*):** Se necesita de la presencia de campos eléctricos fuertes para producir conducción. La conductividad aumenta en el material con la temperatura y con la presencia de impurezas.
- **Dieléctricos (*micas, feldespatos, cuarzo, calcita, silicatos en general*):** Presentan resistividades del orden de  $10^7$  [ $\Omega \cdot m$ ]. Los enlaces iónicos y/o covalentes son predominantes manteniendo los electrones fuertemente ligados.
- **Electrolitos (*soluciones salinas*):** La corriente eléctrica se sustenta en los cationes y aniones presentes en la solución acuosa. La resistividad de un electrolito queda definido como: la resistencia eléctrica presentada por un volumen de electrolitos de forma cúbica y un metro de lado cuando se establece una diferencia de potencial de un volt entre dos caras opuestas.

El método consiste en colocar cuatro electrodos igualmente espaciados en la superficie y alineados; los dos exteriores, conectados en serie a una batería son los electrodos de corriente (medida por un miliamperímetro), en tanto que los interiores se denominan de potencial de la corriente circulante.

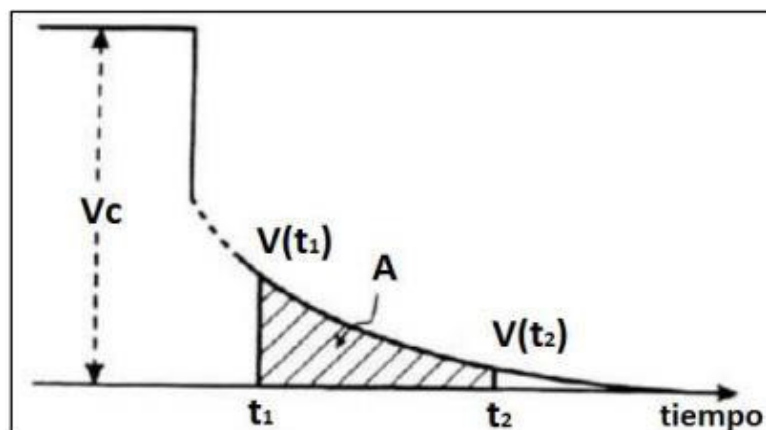
El método sirve, en primer lugar, para medir las resistividades a diferentes profundidades, en un mismo lugar y, en segundo, para medir la resistividad a una profundidad, a lo largo de un perfil. Lo primero se logra aumentando la distancia entre electrodos, con lo que se logra que la corriente penetre a mayor profundidad, lo



segundo se logra conservando la distancia constante y desplazando todo el equipo sobre la línea a explorar.

### 6.2.2. Polarización inducida

El método de polarización inducida mide el decaimiento de voltaje en materiales terrestres, en respuesta a una corriente que es inducida en el subsuelo, el cual genera el efecto IP (*García 2013*). Tal efecto corresponde a un fenómeno complejo que se produce cuando fluidos en espacios porosos de la roca entran en contacto con: minerales metálicos, grafito, arcillas u otros minerales producto de alteración hidrotermal (*Zonge, 2005*), desencadenando una transferencia electrónica entre éstos materiales y electrolitos iónicos del medio que los contiene (roca caja); por tanto, el efecto IP refleja la habilidad de minerales y rocas de actuar como un capacitor eléctrico. La corriente que es inyectada al subsuelo, permite en primera instancia medir la resistividad aparente  $\rho$  a través de un diferencial de voltaje  $V_c$  medido. Una vez suprimida la corriente el voltaje medido a través de los electrodos no decae a cero instantáneamente, sino que lo hace en el orden de mili-segundos a segundos (*Telford et al., 1990*).



**Figura 64.** Medida de IP (Cargabilidad), a través del decaimiento de voltaje (*Reynolds, 1997*).

Existen dos formas de medir la caída de voltaje, una medida en función del tiempo en varias ondas, conocido como “IP time-domain”, y otro basado en el hecho que la resistividad aparente debe variar con la frecuencia, conocido como “IP frequency-domain”, en este caso hablaremos del primero, ya que es el más utilizado por los geofísicos (*García, 2013*).

➤ **Mediciones “Time-domain”**

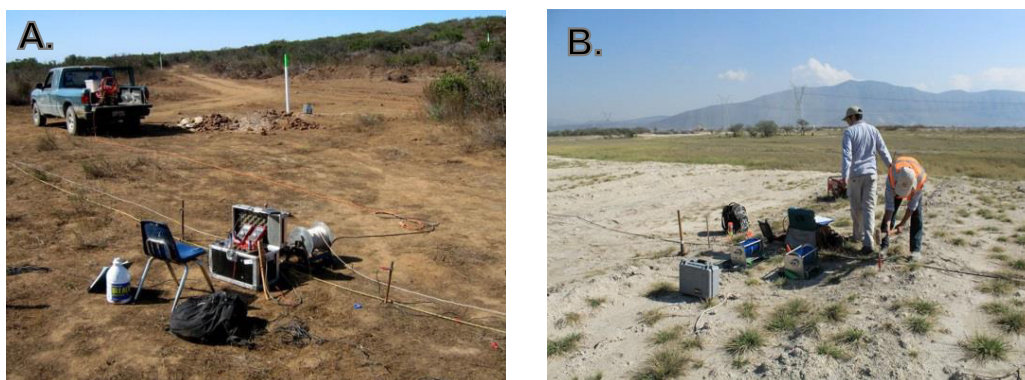
Se trata de la manera más simple de medir el efecto IP en el “dominio del tiempo” y consiste en comparar el voltaje residual  $V(t)$  existente después de suprimir la corriente, versus el voltaje estable  $V_c$  medido mientras la corriente es aplicada.

La cargabilidad corresponde a la medida más utilizada dentro de mediciones del tipo “time- domain” y consiste en el cálculo de la integral de la caída de voltaje entre un tiempo  $t_1$  y  $t_2$ , en varios puntos de la curva (Fig. 64). En el caso en que  $V(t)$  y  $V_c$  tienen las mismas unidades, la cargabilidad  $M$  se expresa en milisegundos (ms).

Mineral	Cargabilidad (ms)
Pirita	13.4
Calcosina	13.2
Cobre	12.3
Grafito	11.2
Calcopirita	9.4
Bornita	6.3
Galena	3.7
Magnetita	2.2
Malaquita	0.2
Hematita	0.0

**Tabla 14.** Cargabilidad de minerales (Telford et al., 1990).

La obtención de los datos de polarización inducida en el campo, son los mismos para la medición de la resistividad, requiriendo el uso de 4 electrodos, 2 de los cuales son usados para introducir corriente y otros 2 para medir el voltaje inducido en el subsuelo. Existen varias configuraciones y formas de desplegar los electrodos de medición en terreno, dependiendo del tipo y de las características físicas del cuerpo que se quiera medir, dentro de los arreglos convencionales más utilizados se encuentran el IP Dipolo-Dipolo.

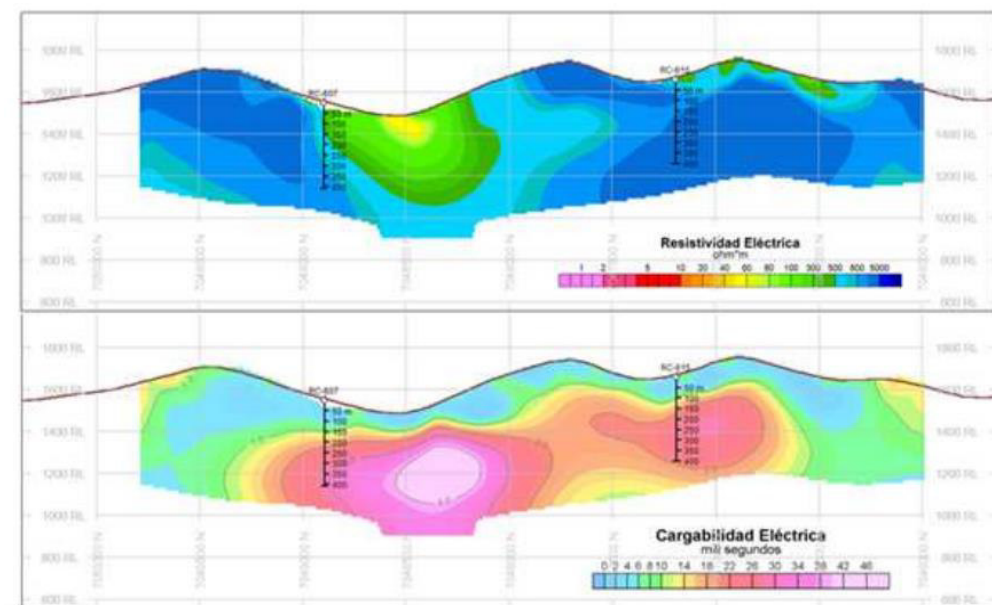


**Figura 65.** A y B) Instalación del punto de inyección de electricidad, éste se ubica a una distancia aproximada de 1 km. de las líneas geofísicas.





**Figura 66.** A) Instalación de placas metálicas, encargadas de conducir la electricidad al subsuelo; B) Elaboración de una pequeña calicata de 0.50 x 0.50 m.; C) Colocación de la placa en la calicata, se le agregó suelo humedecido en la parte inferior y superior; D) Finalización de la instalación, se cubre nuevamente la calicata quedando los dos conectores fuera.



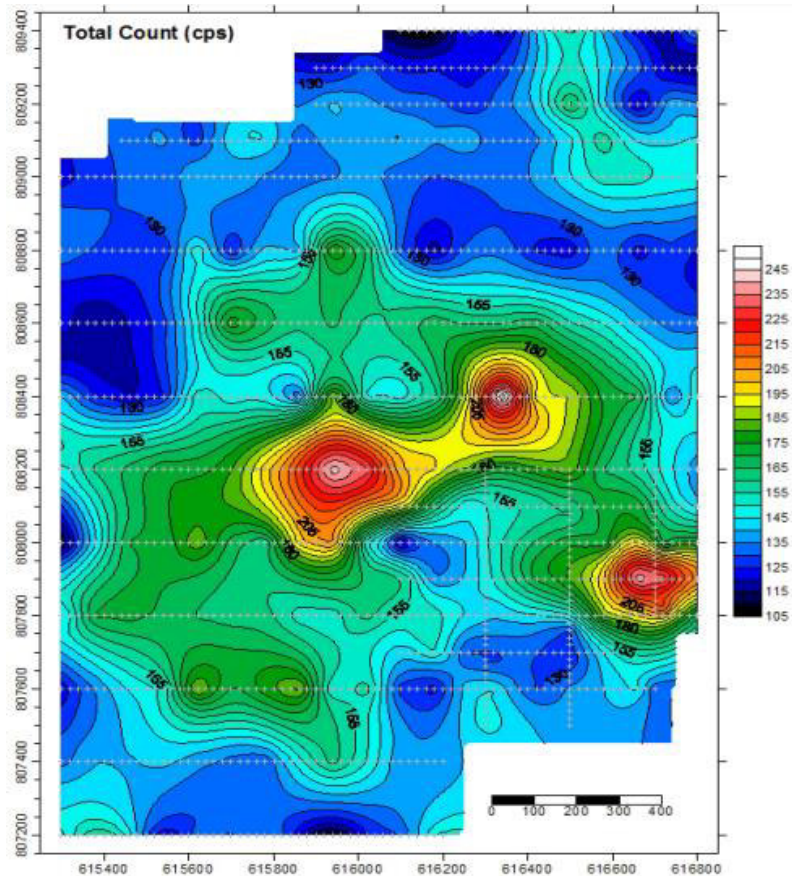
**Figura 67.** Perfiles geofísicos obtenidos como resultado del método de inducción polarizada, se puede observar que la resistividad es opuesta a la cargabilidad.

### 6.3. Radiometría

La radiometría proporciona información sobre los contenidos superficiales de los isótopos radioactivos naturales del  $^{40}\text{K}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , aunque excepcionalmente se pueden utilizar como método indirecto prospectar otros elementos.

Esta radioactividad se puede medir en el terreno, o desde el aire, por medio de aviones o helicópteros. Los instrumentos de medida más usuales son básicamente de dos tipos: Escintilómetros (también llamados contadores de centelleo) o contadores Geiger. No obstante, estos instrumentos solo miden la radioactividad total, sin discriminar la longitud de onda de la radiación emitida (Annels, 1991).

Los resultados obtenidos son mapas con las concentraciones de cuentas totales, porcentaje de potasio y ppm de uranio; además, el análisis de la data permitirá generar un mapa litológico de horizontes geológicos en superficie, que al complementarla con la data magnética, se podrá caracterizar estructuras geológicas, ayudando a identificar patrones o trend estructurales.



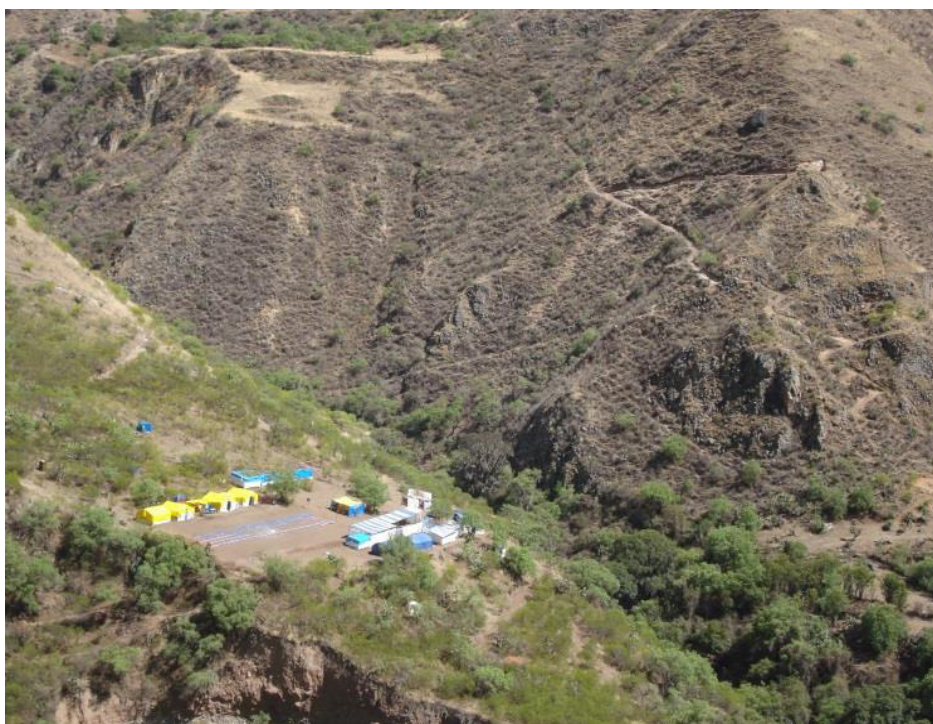
**Figura 68.** Mapa geofísico de radiometría total de conteo total.



## VII. PERFORACIÓN

Es la fase inicial de la exploración, consistente en perforar el subsuelo por medio de taladros; cuyo objetivo es el de obtener información geológica - económica, y delimitar el depósito mineral. El método de perforación será seleccionado por el geólogo, debiéndose ser el apropiado para el material que está siendo investigado. Las altitudes de los collares y de las desviaciones de los pozos, deberán ser tomadas usando técnicas apropiadas de acuerdo al tamaño, ángulo y longitud de los taladros. Los registros del taladro, los formatos o programas específicos adecuados al tipo de perforación, la ubicación geológica particular y los minerales buscados, deberán ser utilizados en el logueo geológico detallando los núcleos y detritos (Buenaventura Ingenieros, S.F).

Las secciones transversales que representan la geología e información básica del pozo, incluyendo la correlación con la geología superficial, debe ser desarrollada y actualizada a medida que la perforación avance. Cualquier información geofísica del taladro o cualquier otra prospección, debe ser incluida en el registro del pozo; recomendándose un registro fotográfico de los testigos de sondeos diamantinos.



**Figura 69.** Proyecto minero en fase de perforación, Proyecto Viruna (Cusco).

Para poder ejecutar la fase de perforación es necesario realizar de carácter obligatorio los siguientes pasos (Aronés, 2012):

- **Declaración de impacto ambiental (DIA)**, de acuerdo al Decreto Supremo (D.S. 020-2008-EM) refiere a que se puede realizar un máximo de 20 plataformas de perforación, el área disturbada será menor a 10 hectáreas considerando en conjunto plataformas, trincheras e instalaciones auxiliares y accesos, asimismo se podrá realizar un total de hasta 50 metros de longitud de túneles. Por eso es recomendable hacer una poligonal del área de interés directa que encierre a los posibles 20 sondeos programados. El titular podrá iniciar sus actividades de exploración en un plazo no mayor a los 12 meses, contados a partir de la fecha de emisión de la resolución de aprobación del estudio ambiental.
- **Construcción de accesos**, se realizan básicamente hacia las plataformas de perforación, para ello es necesario un tractor CAT-D6D, con un avance promedio de 120 a 150 metros por día en tramos semiduros. Es necesario contar con los permisos por escrito y legalizado de los propietarios superficiales. El ancho máximo de las vías de acceso será de 5 m y un mínimo de 3.5 m, siendo 1 m. para la berma de seguridad en zona de roca para caminantes, según el DIA. En cuanto a los ángulos de los taludes de corte en accesos, en zona de roca dura a semidura presentarán un ángulo de 75°, y los taludes de relleno presentarán un ángulo de 45° que se darán en la zona desmontera.



**Figura 70.** Elaboración de accesos por personal, Proyecto Alumbre (La Libertad).





**Figura 71.** Accesos realizados por el tractor D7, se puede observar el ancho de la vía y control adecuado del talud (Proyecto Alumbre).

- **Consumo de agua para los sondeos,** el consumo de agua de la máquina de sondeo de perforación, durante el desarrollo de las actividades de exploración será aproximadamente de  $20.16 \text{ m}^3/\text{día}$  (4435 gal/día), siendo la recirculación máxima de agua en un 30%, entonces el requerimiento neto de agua sería de  $14.112 \text{ m}^3/\text{día}$ , en un avance de 50 m. de perforación promedio.

La alimentación de agua hacia los puntos de perforación puede ser mediante cisterna y/o bombeo de agua en tuberías.



**Figura 72.** Construcción de la poza de almacenamiento de agua.



- **Inspección de la ubicación de los puntos de perforación con GPS o estación total**, los accesos elaborados por el personal ayudarán a llegar a ciertos puntos inaccesibles (Fig. 70), los cuales se marcan con una estaca, etiquetando el número del sondaje con su azimuth e inclinación programada.
- **Preparación del terreno en la plataforma de perforación**, las plataformas tendrán dimensiones máximas de 10 x 10 m. junto a dos pozas de sedimentación, de dimensiones 3m x 2m x 1.5m. aprox. La poza de sedimentación se construye con la finalidad de recircular el lodo y optimizar el uso de agua en la perforación, captando el agua mezclada con bentonita, aditivos biodegradables y roca pulverizada (detritos menores de 0.4 mm) producto de la perforación. Además se colocará una capa de geomembrana sostenida por los bordes con estacas, cuya función es evitar la contaminación del suelo. Una vez concluida las operaciones de perforación se retirarán los lodos y se lavará la geomembrana para su reutilización temporal, en caso que se encuentre en óptimas condiciones. El área disturbada (poza) se rellenará con el mismo material a extraerse.



**Figura 73.** A) Plataforma de 10 x 5 m (Proyecto Curunday); B) Plataforma de 10 x 10 m (Proyecto Viruna); C y D) Pozas de sedimentación, obsérvese la geomembrana de color azul.

- **Movilización e instalación de la perforadora en la plataforma**, el geólogo deberá ubicar la posición de la máquina perforadora, luego, con ayuda de la brújula colocar el azimut e inclinación; todo ello antes del inicio de la operación.

La ubicación del DH\_collar o punto de coordenada donde se encuentra la perforadora deberá tener el azimut, inclinación y fecha de inicio de perforación, qué deberán ser registradas en las hojas de trabajo en Excel.



**Figura 74.** A) Traslado de la perforadora o taladro; B) Instalación de la máquina perforadora diamantina.

- **Consumo de combustible**, en la etapa de exploración el consumo promedio de combustible de cada máquina de perforación será de 100 gal/día aprox. con un avance promedio entre 40 a 50m. día, ello dependerá de las dificultades de la roca a perforar, el consumo total de combustible de cada máquina de perforación dependerá de la longitud total a perforar. Culminado estos pasos, es factible realizar la perforación del subsuelo, por lo que a continuación se especificarán los dos tipos de perforaciones más utilizados en exploración.

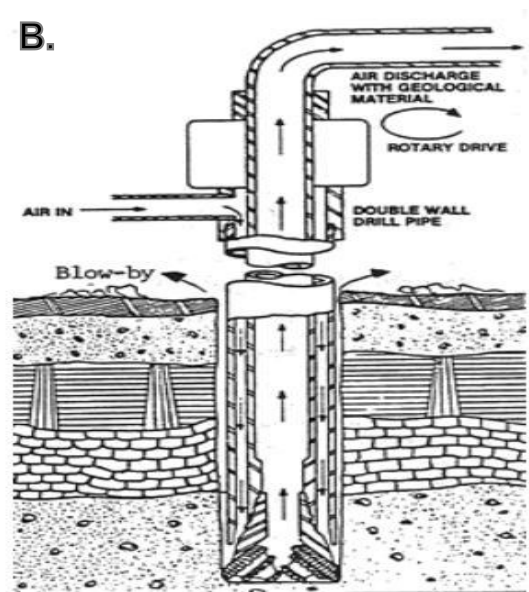
### 7.1. Perforación de aire reverso

La perforación con aire reverso es fundamentalmente diferente a la diamantina, tanto en términos de equipo y toma de muestras, la principal diferencia es que la perforación de aire reverso crea pequeños fragmentos de roca en lugar de un testigo sólido; además de la tasa de penetración y el costo por metro perforado. Se requiere de un



equipo mucho más grande, incluyendo un compresor de aire de alta capacidad (usualmente montado en un camión).

El proceso consiste en inyectar aire comprimido hacia una cámara exterior de un tubo o barra de perforación de doble pared (*Fig. 75*), el cual, éste regresa por el interior del conducto central y arrastra hasta la superficie los fragmentos de roca molidos donde se recuperan y recogen continuamente a medida que avanza la perforación. Las barras de perforación para aire reverso son por lo general de 6" (15,2 cm) y 8" (20,3 cm) de diámetro y 20 pies de largo (6,096 m). Las muestras de roca molida proveniente de la perforación se recogen generalmente en intervalos de 1,5 o 2 m. Durante el proceso de muestreo los fragmentos se lavan en un colador y se colocan en cajas de plástico con compartimientos, éstos son cuidadosamente observados y registrados por un geólogo competente. Por supuesto, algunos tipos de información, como detalles estructurales, no son posibles de obtener en ausencia de roca sólida, a pesar de esta desventaja, todavía se puede obtener una gran cantidad de información valiosa. Es aquella perforación que se hace utilizando una broca diamantada para perforar la roca. Esto le permite actuar como una herramienta de corte de gran efectividad, obteniendo un testigo o "core" de la misma, el cual es extraído, registrado y colocado en cajas porta-testigos para la debida protección y almacenamiento (*ITGE, 2000*).



**Figura 75.** A) Máquina de perforación de aire reverso, obsérvese el camión y castillo; B) Esquema de sondaje de aire reverso con cabezal de tricono, mostrando el flujo de aire comprimido a través de las barras de doble cámara. (*ITGE, 2000*).

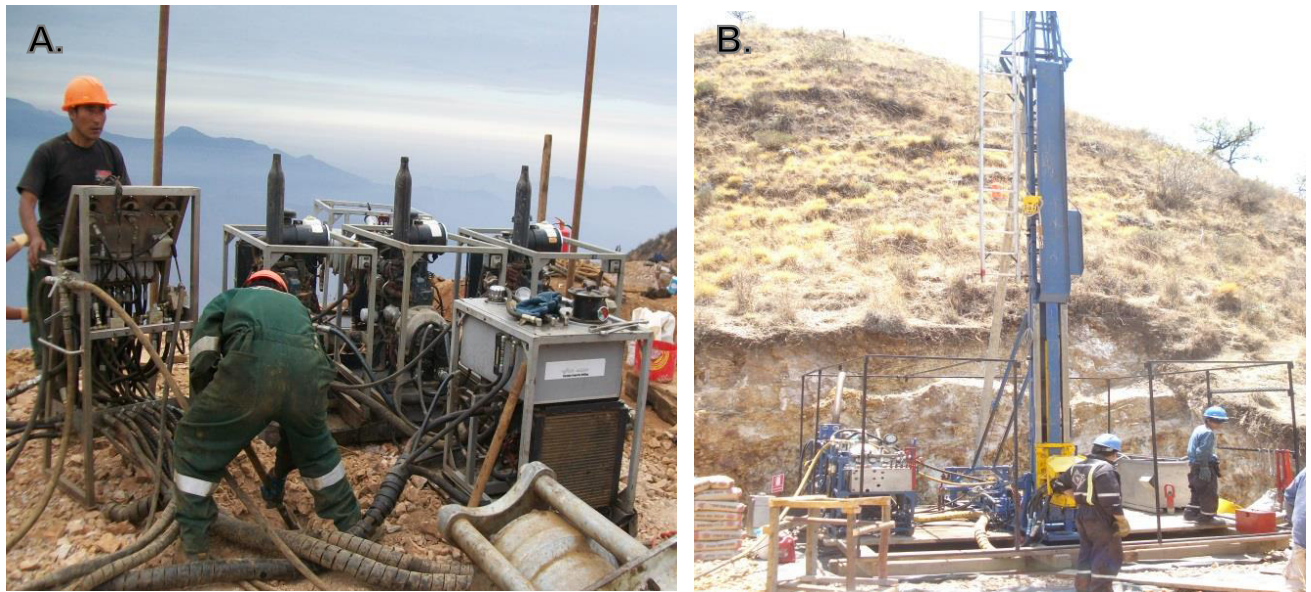
## **7.2. Perforación diamantina**

El equipo básico de perforación diamantina se compone principalmente de una unidad de rotación, un bastidor, bomba de agua y lodos, paneles de comando y una unidad de fuerza (generador). El mecanismo es sencillo, el sistema electro-hidráulico de rotación genera el torque apropiado que empuja con fuerza generando el avance de la perforación, mientras que el sistema de lubricación y refrigeración mantiene el flujo y la presión suficientes para refrigerar la corona y permitir la extracción de las muestras. Los componentes son livianos con el menor posible para facilitar el desplazamiento de los equipos de perforación. De igual forma las barras de perforación se presentan en múltiples medidas para satisfacer las especificaciones del cliente con PQ-115mm, HQ-100mm, NQ-76mm, BQ-51mm o AQ-50mm según sea la necesidad a programarse (Schwarz, 2013).

En el proceso de perforación hay que tener en cuenta lo siguiente (Aronés, 2012):

- El lugar de perforación se mantendrá en buenas condiciones de limpieza, orden y seguridad en todo momento.
- La inclinación de los taladros comúnmente será entre  $-30^{\circ}$  a  $-90^{\circ}$ , dependiendo de la máquina de perforación.
- Se deben adoptar medidas adecuadas de supervisión de perforación para reducir al mínimo la desviación y maximizar la recuperación de los testigos.
- Los testigos de perforación se almacenarán temporalmente en el sitio de perforación; el correcto etiquetado de las cajas y bloques básicos de los testigos serán confirmados antes del transporte a fin de facilitar el registro, éstas serán transportadas de forma segura y de manera que sus elementos internos de la caja no tengan mayor movimiento.
- No se está permitido el acceso de personal no autorizado al sitio de perforación.
- El registro y muestreo será llevado a cabo simultáneamente con la perforación.

- El control del reporte diario de perforación diamantina, es un control detallado y obligatorio llevado por el jefe de perforación y el jefe de proyecto en forma diaria.



**Figura 76.** A) Se observa el panel de control, los generadores eléctricos y el asistente de perforación (Proyecto Curunday); B) Castillo y unidad de rotación con un ángulo de 90° (Proyecto Viruna).

### 7.3. Logueo geológico de testigos

El logueo geológico de testigos, es el procedimiento de examinar, describir e identificar las características geológicas de los sondeos, como minerales económicos, litología, alteración hidrotermal, vtillas, etc.

Para un correcto logueo, asegurarse de tener un orden adecuado de las cajas, verificando que tengan sus etiquetas (código del sondaje, el “de” - “hasta” y número de caja), tacos con medidas notorias y muestras completas.

Se deben seguir los siguientes pasos:

- El geólogo encargado del logueo debe realizarlo a medida que vaya avanzando el sondaje.
- En el registro geológico, se debe considerar la litología, alteración, estructuras y mineralización, siendo lo más esquemático posible de tal manera que facilite la correlación e interpretación. La empresa otorgará su formato de logueo con nomenclaturas.
- Los contactos litológicos deben figurar con el ángulo de corte con respecto al eje del sondeo, los cuales deben ser correlacionados con las medidas de campo.



- La descripción geológica debe ser corta y precisa, utilizando términos geológicos internacionales aceptados.
- Antes de realizar el logeo detallado se debe hacer un logeo rápido (quick login), el cual se deberá hacer a primeras horas de la mañana.



**Figura 77.** A) Ordenamiento de las cajas de testigos para realizar un logeo al detalle (Proyecto Viruna); B) Testigos de perforación separados por tacos medidores (indican la corrida del taladro).



#### **7.4. Intervalos de muestreo**

El geólogo determinará los intervalos de muestreo y marcado de los mismos, ello se basará en los aspectos geológicos y en los límites de la mineralización, que pueden tener significancia para la interpretación del mismo:

- Toda zona con evidencias de mineralización debe ser muestreada; aparte, donde es conveniente, el intervalo de la muestra debe respetar los intervalos de corrida del taladro.
- Se debe muestrear en tramos con estructuras de relleno (ejemplo: vetas de Low Sulfidation), donde los intervalos de muestreo no serán mayores de 1 metro ni menores a 10 cm.
- En alteraciones hidrotermales (High Sulfidation, Porfidos) los intervalos de muestreo no serán mayores a 2 m. ni menores de 10 cm.
- Es común que la longitud de muestreo en sondeos sea cada 2 m. para epitermales y pórfidos, para muestreo de detalle es común usar 1 m.
- La muestra en el intervalo colectado se tomará el 50% del testigo cortado en forma longitudinal al mismo, quedando en caja otro 50% para archivar.

#### **7.5. Fotografiado de corte: archivos de fotografías de testigos enteros y cortados**

Para tomar las fotos de los testigos se contará con un área exclusiva, la cual tendrá una mesa soporte con 45° de inclinación, una cámara fotográfica digital con trípode de 1.5 m de altura, uno o dos soportes de luces reflectores de 1 m. de altura y un banco accesorio; todo este equipo se contará para la obtención de una fotografía de calidad de los testigos:

- Antes de cortar y muestrear se debe fotografiar en forma sistemática y uniforme, con una cámara digital de buena resolución, siendo preferible usar iluminación indirecta natural.

- El procedimiento de la toma de fotografías debe estandarizarse para que las imágenes resultantes sean relativamente uniformes en términos de escala y orientación.
- Las cajas de los testigos deben orientarse de tal manera que la profundidad del taladro incremente de izquierda a derecha y del fondo al tope de la caja.
- Los tacos con las profundidades marcadas, deben ser legibles y visibles en las fotografías.
- Las fotografías de los testigos se tomarán de forma individual y no mayor a tres cajas, aparte serán etiquetadas de manera uniforme con el nombre del proyecto.
- Antes de enviar los testigos al corte y muestreo, las fotografías deben ser bajadas y revisadas en la computadora para su respectivo archivamiento, ya que luego se volverá a realizar la toma con los testigos cortados.
- Se debe realizar “close-up” o fotografías al detalle de los testigos que presenten mineralización visible o alguna característica importante.



**Figura 79.** A) Fotografiado de las cajas de testigos con luz natural indirecta; B) Fotografía de testigos, mostrando el taco de profundidad y el “desde” - “hasta”; C) Foto al detalle o “close up” de venillas.



### 7.6. Corte y muestreo de testigos

El corte de los testigos se realizará con un petrótomo (*Fig. 80*), cuyos discos de sierra son diamantados (para cortar sílice) y tienen un tiempo de vida útil de 1500 m., se recomienda proyectarse para la compra de discos con el total de metros del sondeo. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Seguidamente a la finalización de las fotos de los testigos, se inicia el corte, para ello todas las cajas de testigos deben ponerse en orden consecutivo, para que el corte se inicie desde el tope al fondo de los intervalos seleccionados.
- El corte debe realizarse con sumo cuidado, evitando que salten partículas al exterior, siendo ambas mitades las más representativas posibles.
- El personal de corte debe llevar en todo momento el equipo de seguridad apropiado, protección de ojos y oídos deben ser obligatorios (traje para agua, guantes, etc).
- El área de corte debe mantenerse limpia y ordenada en todo momento, sin que ningún personal extraño ingrese a las instalaciones.



**Figura 80.** A y B) Máquina de corte o petrótomo, se puede observar el disco diamantado utilizado por el personal clasificado, nótese los equipos de protección personal obligatorios.

A continuación se redactará el procedimiento para el muestreo de los testigos:

- Las muestras de testigos deben ser embaladas con bolsa resistente para evitar pérdidas o contaminación.
- Las bolsas de muestras deben ser marcadas con números, uniformemente, legiblemente y con marcador permanente en la parte frontal y en la zona más visible.
- Estándares y blancos deben insertarse en la secuencia de las muestras, en diferentes lugares, según el programa de QA-QC.
- El testigo debe ser muestreado cuidadosamente, removiendo la mitad superior cortada y ser insertada en la bolsa plástica etiquetada previamente.
- La segunda parte del ticket de la muestra, debe adherirse a la caja de testigos para iniciar el siguiente intervalo de muestreo (preferible que este ticket sea plastificado o de metal para evitar su deterioro).
- Los grupos de muestras embaladas en costalillos de polipropileno, deben cerrarse firmemente con un lazo de plástico o engrampando adecuadamente para evitar pérdidas.
- Para seguridad en el transporte, las bolsas etiquetadas deben colocarse en costalillos de polipropileno en números de no menores a 5 ni mayores a 10 bolsas, dependiendo del peso de cada muestra.
- Los costalillos deberán rotularse con el nombre de la compañía, código de las muestras y total de muestras.
- Las cajas de cores deben cubrirse con sus tapas respectivas y apiladas de manera ordenada y segura para su transporte a la sala de almacenamiento, para posteriores trabajos.



- Deben agruparse todas las muestras de cada taladro para ser enviadas al laboratorio para su preparación y análisis.



**Figura 81.** A) Muestreo de testigos; B) Colocación de las muestras en las bolsas especiales; C) Tarjeta de muestreo; D) Corte de colchones de espuma para proteger las muestras; E) Aseguramiento de la caja de testigos; F) Apilamiento de las cajas de testigos.

### 7.7. Culminación de la perforación

Al culminar la perforación en una plataforma debe realizarse la remediación del área disturbada, a continuación se presentan los pasos a seguir:

- Las plataformas se deben limpiar de cualquier residuo sólido o líquido, inmediatamente después de la finalización y extracción del anillo de perforación.
- Los caminos de acceso deben ser recuperados de conformidad con las especificaciones establecidas en el reporte D.I.A.
- Los puntos donde se extrajo el taladro será marcado con un monumento de cemento con tubo PVC conectado en la misma orientación del sondaje, el código del taladro debe estar gravado en el cemento con toda la información necesaria tales como coordenadas UTM, elevación, azimuth, inclinación, profundidad final, fecha de inicio y término.
- La ubicación del pozo perforado, será analizado con una estación total o GPS, tan pronto sea posible, después de la finalización del monumento de cemento.
- Los datos del pozo de perforación, finalmente tendrán los siguientes datos: coordenadas UTM, Este, Norte, altitud, inclinación y profundidad total y se publicarán en la hoja de cálculo.



**Figura 82.** A) Remediación de plataforma de perforación; B) Monumento de cemento colocado al finalizar la perforación (Proyecto Curunday).

## **VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1. CONCLUSIONES**

Se concluye que en base a las premisas geológicas e interpretación de la información existente, la persona calificada o geólogo puede decidir y seleccionar que métodos y herramientas de prospección y exploración serán usados. En el planeamiento, implementación y supervisión de cualquier trabajo, el geólogo debe asegurarse de que las prácticas seguidas están basadas en los criterios, que generalmente se aceptan en la industria o que pueden ser justificados razonablemente con fundamentos científicos o técnicos.

Las premisas geológicas sobre la cuales se conduce el trabajo de prospección y exploración, que incluyen el tipo del depósito, el marco geológico y estilo de la mineralización buscado, deben ser respaldadas por datos relevantes de campo y un enfoque científico razonable.

La interpretación comprensiva y continua de todos los datos de la prospección y exploración es una actividad esencial durante todas las etapas del proyecto o prospecto, debiéndose hacer para evaluar los resultados del trabajo. Esta interpretación debe basarse en toda la información recogida a la fecha, ser sistemático y minucioso, descrito y documentado y discutir cualquier información que parezca inconsistente con la interpretación seleccionada.

### **8.2. RECOMENDACIONES**

La densidad de los datos que se colecta de los trabajos de prospección y exploración, debe ser evaluada críticamente en cuanto a su capacidad de dar soporte, cualitativa y cuantitativamente, a las conclusiones.

La interpretación y estimación de los resultados del programa al final de cada fase, sirven para determinar si se han alcanzado los objetivos del programa o si es necesario un trabajo adicional.

Cualquier plan para el trabajo futuro debe identificar objetivos y programas de exploración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Acosta, J., Rodríguez, I., Villarreal, E., Huanacuni, D.- 2011: Memoria sobre la geología económica de la región Apurímac; Programa de metalogenia, INGEMMET.
- Aguilaf, S. – 2012: Análisis geológico de estudios geofísicos de polarización inducida (IP) en sistemas IOCG y pórfidos cupríferos del norte de Chile, Universidad de Chile.
- Aronés Oré, Yuri. – 2014: Aseguramiento y control de calidad para el muestreo (QA/QC) – Promesa Ltd.
- Aronés Oré, Yuri. – 2014: Guía de perforación diamantina – Promesa Ltd.
- Barnes, J., Lisle R. -2004: Basic Geological Mapping, fourth edition.
- Berkman, A. - 2001: Field geologists manual, The Australasian Institute of mining and Metallurgy, fourth edition.
- Echavarría L. -2002: Mapeo en terrenos volcánicos, School of mines Colorado.
- García E. – 2013: Aplicación de la geofísica en la exploración y búsqueda de depósitos y estructuras favorables para la mineralización de oro en la parcela, Minera Choco 10.
- Instituto tecnológico Geo minero de España -2000: Manual de perforación y voladura de rocas.
- Likefield Research – 2002: Guía minero ambiental para exploración, Ministerio de Energía y minas, Ceri-Colombia.



- Lugo, R. – 2010: Manual breve de muestreos geológicos, rocas, suelos, sedimentos y aguas, ITKnowlogics S.A.S, Universidad de Bucarest, Rumania, 10 de noviembre, 2010.
- Lucio Plazolles Armando-2011: Manual Teórico-Práctico de los Depósitos de Pórfidos de Cobre-Sociedad Geológica del Perú, p.265.
- Marquina, M.- 2009: Control estructural y potencial exploratorio del distrito minero de Conga, Cajamarca - Perú, tesis para optar el grado de maestro en ciencias con mención en ingeniería geológica, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Maksaev Victor 2001: Curso de Metalogenia-Departamento de Geología-Universidad de Chile.
- McClay K. – 1990: The mapping of geological structures, Geological Society of London Handbook.
- Perello, J., Carlotto, V., Zarate, A., Caballero, A., Fuster, N. and Murh R. – 2003: Porphyry-Style alteration and mineralization of the Middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru. Economic Geology, Vol. 98.
- Rivera, R., Bustamante, A., Acosta, J., Santisteban, A., - 2010: Evaluation of Ore Deposit Potential in the Andahuaylas - Yauri Batholith, Mineral Resources and Energetic Direction Metallogeny Program, INGEMMET.
- Siegel F. – 1992: Geoquímica aplicada, Departamento de geología, The George Washington University, D. C., Estados Unidos.
- Vargas, E., - 2004: Curso compacto de prospección geoquímica, INGEMMET.
- Vargas - 2009 Distribución geoquímica Tierras Raras y otros elementos traza en la franja polimetálica 9°-10°S del Perú Central, p.195.